

Lauri Heikkilä

Kymen krematorion lämmöntalteenoton suunnittelu

Opinnäytetyö
Energiatekniikan koulutus

2018



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tekijä/Tekijät	Tutkinto	Aika
Lauri Heikkilä	Insinööri (AMK)	Kesäkuu 2018
Opinnäytetyön nimi		
Kymen krematorion lämmöntalteenoton suunnittelu		49 sivua 3 liitesivua
Toimeksiantaja		
Kotka-Kymin seurakunta		
Ohjaaja		
Lehtori Hannu Sarvelainen		
Tiivistelmä		
<p>Opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella ja mitoittaa Kymen krematoriolle lämmön talteenottojärjestelmä, niin että työ voi toimia pohjana lämmön talteenottojärjestelmän suunnitteluun ja kartoituksena energian säästöpotentiaalista. Järjestelmän päätavoitteena on alentaa savukaasujen lämpötilaa.</p>		
<p>Tuhkausuunin savukaasuissa vapautuu ulkoilmaan ympäristölle haitallisia päästöjä, muun muassa raskasmetalleja sekä pienhiukkasia. Savukaasujen puhdistamiseksi, lämpötila on saatava 200 °C:een tai alle. Tämä on mahdollista lämmön talteenottolaitteistolla. Koska laitteisto täytyy rakentaa, on lämpöenergian hyödyntäminen järkevää jo pelkästään energiatehokkuuden näkökulmasta.</p>		
<p>Arvot laskuihin saatiin haastatteluista, mittaamalla ja keräämällä tietoa muista krematorioista. Savukaasujen lämpötilaa ei saatu selvitettyä mittaamalla, sillä savukaasukanavansijainti esti mittauksen suorittamisen. Laskennassa käytettiin vanhoja lokitietoja tuhkausuunin toiminnasta sekä muiden krematorioiden lämmön talteenottolaitteistojen mitoituslämpötiloja.</p>		
<p>Opinnäytetyön tuloksena saatiin Kymen krematorion savukaasujen tehoille sopiva lämmön talteenottojärjestelmän mitoittama. Mitoitus suoritettiin käyttämällä vanhan tuhkausuunin lokeja, sekä muiden krematorioiden mitoituslämpötiloja. Työn aikana kävi ilmi, ettei nykyiseen savukaasukanavaan ole mahdollista mahdollistaa tarpeeksi suurta lämmönsiirintä. Lämmitysenergiassa saavutettu säästö riippuu siitä, kuinka suuri säiliö lämpöenergiavarastoksi valitaan. Energiasäästöpotentiaali on 45–78 % vuotuisesta lämmitykseen kuluneesta energiasta. Tämä vastaa 150–261 MWh lämpöenergiaa tai 15,7–27,4 m³ kevyttä polttoöljyä.</p>		
<p>Opinnäytetyölle asetetut tavoitteet saavutettiin pääsääntöisesti. Opinnäytetyön tuloksia voidaan käyttää suunniteltaessa lämmön talteenottojärjestelmän toteutusta Kymen krematorion ja arvioitaessa mahdollista takaisinmaksu aikaa investoinnille.</p>		
Asiasanat		
krematorio, lämmöntalteenotto, savukaasu, tuhkausuuni		

Author (authors)	Degree	Time
Lauri Heikkilä	Bachelor of Engineering	June 2018
Thesis Title		49 pages 3 pages of appendices
Desingning Heat Recovery for Kymi Crematorium		
Commissioned by		
Kotka-Kymin seurakunta		
Supervisor		
Hannu Sarvelainen Senior Lecturer		
Abstract		
<p>The objective of the thesis was to design a heat recovery system for the Kymi Crematorium. The thesis is supposed to act as a base for designing the heat recovery system and as an analysis of the energy saving potential. The main purpose for the heat recovery system is to lower the flue gas temperature to allow the use of flue gas scrubber.</p> <p>The flue gasses of cremator furnace release a lot of pollutants that are harmful to the environment and to the air, such as heavy metals and particulates. To remove these pollutants the temperature has to be lowered to 200 °C or under. It is possible to use heat recovery system to achieve this. From the energy saving perspective it is sensible to try to use this captured energy.</p> <p>The project was conducted by interviewing, measuring and gathering data. Because of the placement of the flue gas channel, measuring the flue gas temperatures was impossible. To get a value for the flue gas temperature, an old log was used as also the design temperatures of two crematoriums, where similar heat recovery systems were already installed.</p> <p>The design calculations showed that it was not possible to fit a heat recovery system large enough, to the present flue gas channel. The calculations also showed that, with the heat recovery system it would be possible to save, depending on the size of the heat energy storage, 45–78 % of the heating energy that is currently used per year. This is equivalent of 150–261 MWh of energy or 15.7–27.4 m³ of light fuel oil.</p> <p>The thesis met its objectives. The results of this thesis can be used by the Kotka-Kymin seurakunta, to design a heat recovery system for Kymi Crematorium and to assess the repayment term of the investment.</p>		
Keywords		
crematorium, crematory furnace, flue gas, heat recovery		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	8
2	KYMEN KREMATORION JA KAPPELIN NYKYTILANNE.....	8
2.1	Espoon siunauskappelin krematorio.....	10
2.2	Pyhän Ristin kappelin krematorio, Turku.....	12
3	TERMODYNAMIIKAN PÄÄSÄÄNNÖT.....	13
3.1	Lämmönsiirron teoria.....	13
3.2	Johtuminen.....	14
3.3	Konvektio.....	14
3.4	Säteily.....	15
4	LÄMMÖN TALTEENOTTOJÄRJESTELMÄN TOIMINTA JA KOMPONENTIT.....	15
5	SELVITYSTYÖ JA DATAN KERÄÄMINEN.....	21
6	LÄMMÖNSIIRTIMEN MITOITUS.....	25
6.1	Savukaasuvirran teho.....	27
6.2	Lämmönvaihtimen tehon mitoitus.....	29
6.3	Tarvittava putkipinta-ala.....	30
6.4	Tarvittava putken kokonaispituus.....	31
6.5	Savukaasun tiheyden laskeminen.....	31
6.6	Savukaasujen virtaus.....	32
6.7	Putkirivien määrä ja pituus.....	34
6.8	Putkikoon valinta ja vesipiirin mitoitus.....	36
6.9	Lämmönsiirtimen pituus.....	38
6.10	Energiansäästö.....	39
7	TULOSTEN TARKASTELU.....	43
8	YHTEENVETO.....	45
	LÄHTEET.....	46
	KUVALUETTELO.....	47

LIITTEET

Liite 1. Pyhän Ristin kappelin LTO suunnitelma

Liite 2. Lämmön pysyvyys taulukko

Liite 3. Jäännösenergian laskentataulukko

Symboliluettelo

$A_{käy}$	kanavan käytettävissä oleva pinta-ala	[m ²]
A_{putki}	putken vaadittu pinta-ala	[m ²]
A_{sv}	savukaasujen tarvitsema pinta-ala	[m ²]
$A_{vesiputki}$	yhden putken veden virtauksen pinta-ala	[m ²]
$A_{yksi\ putki}$	yhden putken virtauspinta-ala	[m ²]
C_p	savukaasun ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kg°C]
$C_{p,vesi}$	veden ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kg°C]
D	valitun putken ulkohalkaisija	[m]
$D_{etäisyys}$	kieppien etäisyys toisistaan	[m]
$d_{työ}$	toimintapäivien lukumäärä	[kpl]
h_{kanava}	savukaasukanavan korkeus	[m]
$h_{käyttö}$	tuhkausuunin käyttöaika päivässä	[h/d]
$h_{lämpö}$	lämmön pysyvyys tunteina	[h]
k	kokonaislämmönsiirtymiskerroin	[W/m ² °C]
$k_{käyttöaste}$	käyttöastekerroin	[-]
k_{sv}	savukaasuissa tapahtunut lämpötilamuutos	[-]
l_{kok}	tarvittava putken kokonaispituus	[m]
l_{lto}	lämmönvaihtimen pituus	[m]
l_{rivi}	putkirivin pituus	[m]
M	kokonaiskosteus	[%]
$m_{ihminen}$	ihmisen massa	[kg]
$m_{öljy}$	öljyn massa	[kg]
w	savukaasun virtausnopeus	[m/s]
X_{putki}	putkirivien lukumäärä	[kpl]
$X_{rivien\ väli}$	putkirivien välinen etäisyys	[m]
p	paine	[Pa]
$P_{jäännös}$	veden ominaislämpökapasiteetti	[kW]
$Q_{ei,varasto}$	säästetty lämpöenergiapotentiaali ilman varastointia	[MWh]
$Q_{jäännös}$	jäännösenergia	[MWh]
$Q_{net,d}$	kuivan aineen tehollinen lämpöarvo	[MJ/kg]
$Q_{net,ihminen}$	ihmisen tehollinen lämpöarvo	[MJ/kg]
$Q_{net,öljy}$	öljyn tehollinen lämpöarvo	[MJ/kg]
$Q_{koko,a}$	kokonaisvuosienergiankulutus	[MWh]

$Q_{kok, jäännös}$	kokonaisjäännösenergia	[MWh]
$Q_{säiliö}$	säiliön potentiaalinen energiamäärä	[kWh]
Q_{tuhka}	savukaasuihin siirtynyt energia	[MJ]
q_m	savukaasun massavirta	[kg/s]
$q_{m,putki}$	yhden putken veden massavirta	[kg/s]
$q_{m,vesi}$	veden massavirta	[kg/s]
q_v	savukaasun tilavuusvirta	[m ³ /s]
$q_{v,putki}$	yhden putken veden tilavuusvirta	[m ³ /s]
R	ilman kaasuvakio	[J/kgK]
T	savukaasun keskimääräinen jäähtymä	[K]
T_{ennen}	savukaasujen lämpötila niiden tullessa lämmönvaihtimelle	[°C]
t	tuhkaukseen kulunut aika	[s]
$V_{säiliö}$	säiliön tilavuus	[m ³]
\ddot{O}_{hinta}	öljyn hinta	[€/MWh]
ΔT	vedenlämpötilan muutos vaihtimessa	[°C]
ΔT	polttamisen aiheuttama lämpötilan muutos 20 °C:sta 750 °C:seen.	[°C]
ΔT_A	virtojen lämpötilaero lämmönvaihtimen alkupäässä	[°C]
ΔT_B	virtojen lämpötilaero lämmönvaihtimen loppupäässä	[°C]
ΔT_{log}	logaritminen lämpötilaero	[°C]
ΔT_{lto}	lämmönsiirtimessä tapahtunut lämpötilan muutos	[°C]
$\Delta T_{säiliö}$	säiliön lämpötilan muutos	[°C]
Δx	aineen paksuus	[m]
ϕ	savukaasun teho	[kW]
ϕ_{lto}	lämmönvaihtimen teho	[MW]
ϕ_{sv}	savukaasujen teho	[MW]
ρ_{sv}	savukaasun tiheys	[kg/m ³]
$\rho_{vesi,95^\circ C}$	veden vedentiheys 95 °C lämpötilassa	[kg/m ³]

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyön tavoitteena on selvittää ja suunnitella lämmön talteenottojärjestelmän toteutus Kymen krematorion tuhkausuunin savukaasuista Kotka-Kymin seurakunnalle. Opinnäytetyössä suunnitellun järjestelmän päätarkoituksena on madaltaa savukaasujen lämpötilaa savukaasujen puhdistamisen mahdollistamiseksi. Työ toteutetaan laskemalla mitoitusarvot selvitettyillä ja mitatuilla arvoilla.

Työn toisena tavoitteena on selvittää saavutettavat säästöt silloin, kun järjestelmän keräämä lämpöenergia käytettäisiin paikallisesti hyödyksi Parikan kappelin lämmityksessä.

Opinnäytetyössä tehdyn selvityksen ja mitoituksen avulla on Kotka-Kymin seurakunnan mahdollista aloittaa laitteiston suunnittelu, sekä käyttää tietoja apuna arvioitaessa järjestelmän rakentamisen kustannuksia ja mahdollisia koituneita säästöjä.

Opinnäytetyössä kappaleessa kaksi selvitetään Kymen krematorion nykytilanne sekä vastaavien järjestelmien toteutus muissa krematorioissa. Kappaleissa kolme ja neljä käydään läpi termodynamiikan perusteita sekä lämmönsiirtimen toimintaa ja komponentteja. Kappaleessa numero viisi selvitetään tehtyä esiselvitys työtä ja aineiston keräämistä. Kappaleessa kuusi lasketaan lämmön talteenotto laitteiston mitoittaminen, sekä lasketaan mahdollisesti saavutettavat energian säästöt. Kappaleessa seitsemän käydään läpi laskennassa saavutetut tulokset ja pohditaan järjestelmän hyödyllisyyttä.

2 KYMEN KREMATORION JA KAPPELIN NYKYTILANNE

Kymen krematorion nykytilanteessa, savukaasuille ei tehdä mitään. Savukaasuja ei suodateta ja lämpöä ei oteta talteen, vaan se johtuu ja siirtyy ulkoilmaan. Tulevaisuudessa kiristyvät päästörajat edellyttävät savukaasujen puhdistuslaitteistojen asentamista. Tämän seurauksena savukaasujen lämpötila tulee laskea 200 °C:seen puhdistuslaitteistojen toiminnan mahdollistamiseksi. Krematorio tuhkausuunin toiminta tuottaa huomattavia määriä lämpöä ja koska päästöjen vähentämiseksi savukaasujen lämpötilaa tulee kuitenkin joka

tapauksessa alentaa, niin on loogista yrittää hyödyntää savukaasujen lämpöenergia.



Kuva 1. Parikan kappeli

Parikan kappelin (kuva 1) lämmittämiseen käytettiin vuonna 2016 n. 38 000 litraa öljyä, ja mikäli savukaasuista kerätty hukkaenergia saataisiin hyödynnettyä, vähenisi kappelin lämmitysöljyn kulutus huomattavasti. Vähentynyt öljyntarve alentaisi kappelin lämmityksestä syntyviä hiilidioksidipäästöjä. Tuhkausuunin savukaasujen lämpötilan alentaminen mahdollistaisi myös savukaasujen puhdistuksen, mikä alentaisi huomattavasti ympäristöllä haitallisia päästöjä, kuten pienhiukkasia ja raskasmetalleja. Alentuneiden puhtaammat savukaasut auttavat saavuttamaan tulevaisuudessa kiristyvät päästövaatimukset krematorioille.

Suomessa on 21 kpl krematorioita joista kuudesta on toteutettu savukaasujen suodatus ja savukaasujen lämmöntalteenotto. Neljässä yksikössä kerätty lämpöenergia käytetään lämmittämiseen. Yhdessä krematoriossa lämpöenergia käytetään lämmitykseen, mutta ylimääräinen energia myydään ja viimeisessä krematoriossa kaikki lämpöenergia myydään. Näistä krematorioista esittelen tarkemmin kahta: Espoon siunauskappelin krematoriota sekä Turun Pyhän Ristin kappelin krematoriota. Yhteistä kaikille krematorioiden järjestelmille on kuitenkin se, että niiden savukaasujen lämmönhyödyntämiseen on päädytty, koska savukaasujen lämpötilaa on täytynyt madaltaa puhdistuslaitteiston toiminnan takia. (Ollila 2018).

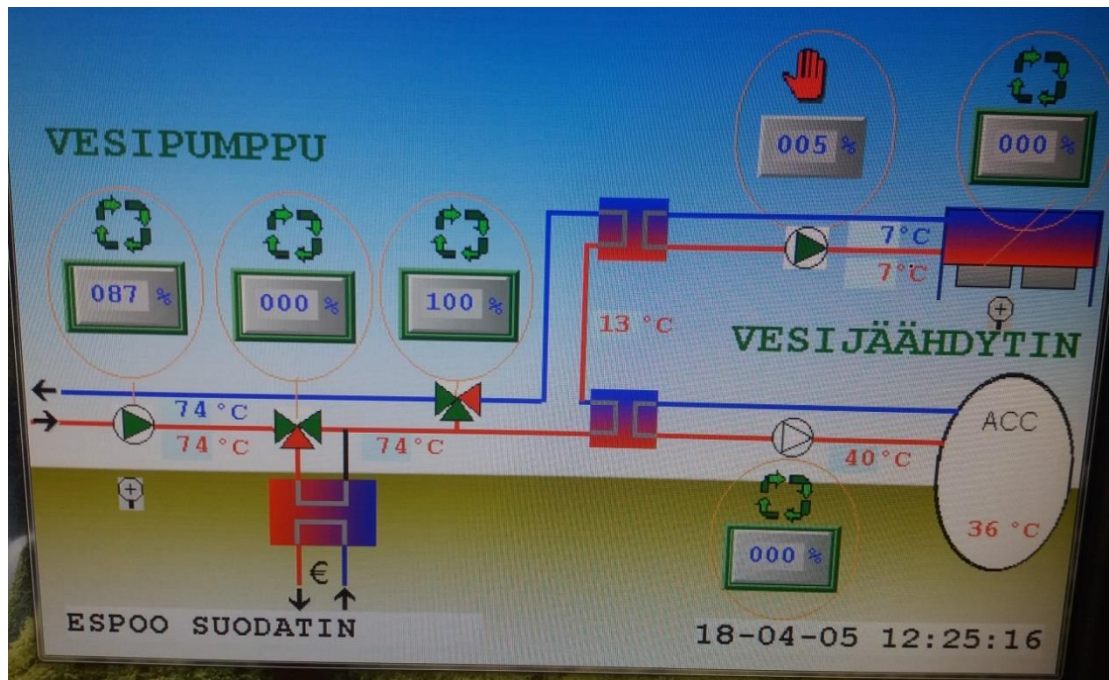
2.1 Espoon siunauskappelin krematorio

Espoon siunauskappelissa (kuva 2) on kaksi tuhkausuunia. Krematorion järjestelmä on kuitenkin mitoitettu vain yhdelle uunille. Tämä ei kuitenkaan ole krematorion toiminnan kannalta ongelma sillä tuhkausuuneja käytetään vuorotellen, niin että vain toinen uuneista suorittaa polttoa. Espoon siunauskappelin krematorion savukaasuista kerätty lämpö varastoidaan n. 80 m³ vesisäiliöön. (Ollila 2018)



Kuva 2. Kuva Espoon siunauskappelista

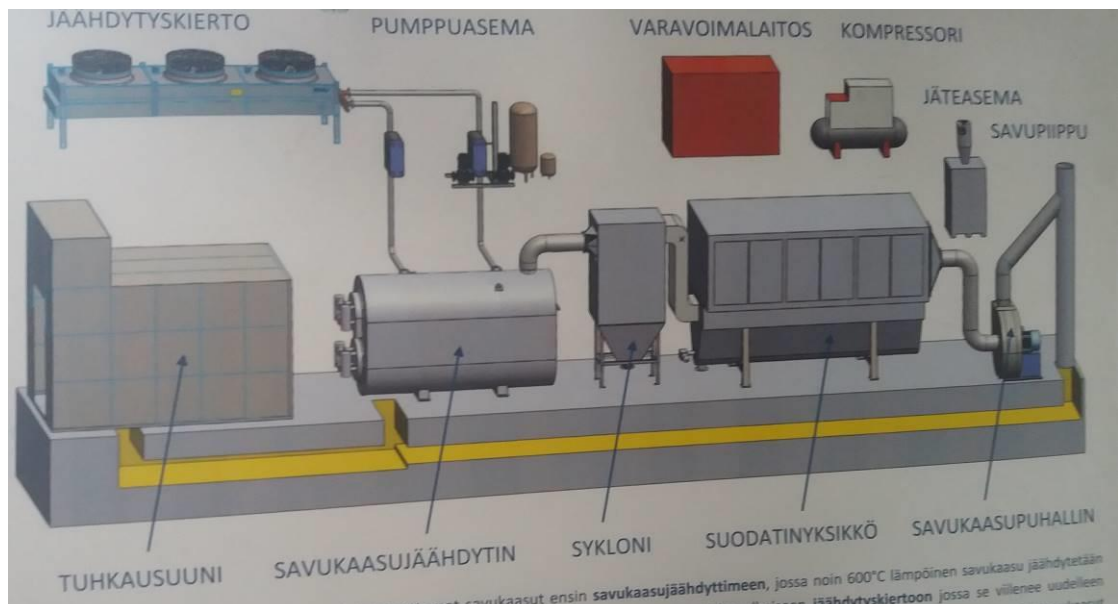
Säiliön (kuvassa 3, ACC) maksimilämpötilaksi on säädetty 70 °C. Säiliön vettä käytetään kappelin lämmittämiseen sekä lämpimänkäyttöveden tuottamiseen. Jos lämpöenergiavarasto on täynnä (70 °C), pyritään lämpöenergia syöttämään Fortumin kaukolämpöverkkoon. Mikäli lämpöenergiaa ei voi syöttää kaukolämpöverkkoon, lämpöenergia siirretään lauhduttimelle, mikä siirtää lämpöenergian ulkoilmaan. Mikäli piirissä kiertävä vesi on liian kylmää, että sitä voitaisiin syöttää kaukolämpöverkkoon, palautuu vesi takaisin savukaasujäähdyttimelle. (Ollila 2018)



Kuva 3. Kuva Espoon krematorion lämmön talteenoton ohjausnäkyvästä

Laitteiston toiminta

Kuvassa 4 on havaintokuva Espoon siunauskappelin krematorion lämmön talteenotto- ja savukaasujen puhdistusjärjestelmästä.



Kuva 4. Espoon siunauskappelin krematorion lämmön talteenottojärjestelmän ja savukaasujen puhdistusjärjestelmän havainnekuva.

Tuhkausuunissa poltetaan kevyttä polttoöljyä. Öljyn ja biologisen materiaalin palamisesta syntyvä energia siirtyy savukaasukanavaa pitkin savukaasujäähdyttimelle, jossa 600 °C savukaasu jäähdytetään 120 °C:n lämpötilaan. Savu-

kaasujäähdyttimeltä savukaasu siirtyy sykloniin, jossa savukaasuista esi-erotellaan isot partikkelit. Savukaasut siirtyvät suodatinyksikköön, jossa kalkkiaktiivihiliseoksella päällystetyt suodatinkankaat suodattavat raskasmetallit ja muut haitalliset aineet. Suodatinyksiköltä savukaasut siirtyvät savupiippuun. Järjestelmän vaatima veto tuotetaan savukaasupuhaltimella, joka luo alipaineen järjestelmään saaden savukaasut virtaamaan kanavassa.

2.2 Pyhän Ristin kappelin krematorio, Turku

Pyhän Ristin kappelin (kuva 5) nykyinen talteenottojärjestelmä on yksinkertainen ja koostuu savukaasukanavaa ympäröivästä vesivaipasta. Lähitulevaisuudessa suunnitteilla oleva lämmön talteenottojärjestelmä tulee tuottamaan huomattavasti enemmän lämpöenergiaa ja mahdollistamaan suodatuslaitteiston käyttöönoton laskemalla savukaasujen lämpötilan vaaditulle tasolle.



Kuva 5. Kuva Pyhän Ristin kappelista

Järjestelmä koostuu kahdesta savukaasukanavasta, joissa kummassakin on kaksi lämmön talteenottolaitteistoa. Savukaasujen alkulämpötila on järjestelmässä n. 700 °C. (Liite 1)

Tuhkausuunin savukaasuista kerättyä lämpöenergiaa Pyhän Ristin kappelin krematoriosta on tarkoitus käyttää kappelin lämmitykseen, käyttöveden lämmittämiseen sekä syöttää ylimääräinen lämpöenergia kaukolämpöverkkoon.

Pyhän Ristin kappelin piirustukset, sekä lisätiedot laitteiston toiminnasta sain sähköpostihaastattelulla Mäkilä Tapiolta, jonka yritys, Tmi Energianhallinta, on vastuussa järjestelmän suunnittelusta.

3 TERMODYNAMIIKAN PÄÄSÄÄNNÖT

Termodynamiikassa on neljä pääsääntöä. Niistä tarvitsemme kolmea ensimmäistä, kun tarkastelemme tämän opinnäytetyön ohessa ilmeneviä fysikaalisia ilmiöitä.

Nolla-pääsäännön mukaan eristetty systeemi pyrkii termiseen tasapainoon eli tilaan, jossa lämpötilaerot tasoittuvat ja hakevat yhtenäisen lämpötilan.

Ensimmäinen pääsäännön mukaan energiaa ei voi muodostua tai hävitä, mutta se voi muuttaa muotoaan. Esimerkiksi polttomootorissa polttoaineen sisältämä energia ei häviä taivaalle, vaan se muuttuu moottorissa mekaaniseksi työksi sekä lämmöksi.

Toisen pääsäännön mukaan systeemi pyrkii itsestään kohti termodynaamista tasapainotilaa eli entropiaa.

Kolmannen pääsäännön mukaan absoluuttista nollapistettä ei voida koskaan saavuttaa. (Valtanen 2012, 241)

3.1 Lämmönsiirron teoria

Lämpöenergian siirtymisessä lämpöenergiaa siirtyy aineesta toiseen. Tästä johtuen edellytyksenä lämpöenergian siirtymiselle on aineiden välinen lämpötilaero. Termodynamiikan II pääsäännön mukaan lämpöenergia siirtyy aina korkeasta lämpötilasta matalampaan. Lämpöenergia pyrkii tasapainotilaan, jossa aineiden välinen lämpötila olisi yhtenevä. Lämmönsiirtyminen voidaan erotella pääasiallisesti kolmeen esiintymismuotoon: johtumiseen, konvektioon ja säteilyyn. (Valtanen 2012, 241)

3.2 Johtuminen

Lämmönjohtuminen on lämpöenergian siirtymistä aineessa systeemin sisällä tai toiseen systeemiin. Tämä lämmönjohtuminen on molekyylien keskinäistä törmäilyä ilman aineenvaihduntaa. Lämmönjohtavuus on fysikaalinen ominaisuus joka kuvaa materiaalin kykyä johtaa lämpöä. Tosiasiassa lämmönjohtavuus vaihtelee systeemin eri osissa, mutta usein systeemin lämpötila ajatellaan vakiona. (Fagerholm 1986, 255-256.)

Lämmönjohtuminen Fourierin 1 lain mukaan:

$$\Phi = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

Jossa	Φ	Lämpövirta eli lämpöteho	[W]
	λ	Lämmönjohtavuus	[W/mK]
	ΔT	Pintalämpötilojen erotus	[°K]
	Δx	Aineen paksuus	[m]

3.3 Konvektio

Konvektio on liikkuvasta nesteestä tai kaasusta tapahtuvaa lämpövirtausta kiinteään pintaan tai kiinteästä pinnasta lämpöenergian siirtymisestä nesteseen tai kaasuun. Konvektiota esiintyy niin sanotusti pakotetusti sekä vapaasti. (Fagerholm 1986, 256-257)

Pakotetussa konvektiossa nesteen tai kaasun virtaus aiheutuu ulkoisista syistä, kuten pumpusta tai puhaltimesta. Pakotettua konvektiota on esimerkiksi hiustenkuivaajan toiminta. Lämmityselementin lämpöenergiaa siirretään ilmaan puhaltamalla ilmaa lämpöelementin läpi.

Vapaassa konvektiossa nesteen tai kaasun virtaus aiheutuu painovoimaisesti tai keskipakovoimaisesti, eli veden tai kaasun virtaukseen ei vaikuta ulkoisia voimia. Esimerkkinä vapaasta konvektiosta on veden kiehuminen kattilassa. Kattilan pohjan läpi siirtyy lämpöenergiaa veteen. Virtaus syntyy lämpötilan nousun aiheuttamasta tiheyserosta. Kuuman veden tiheys laskee ja tämän

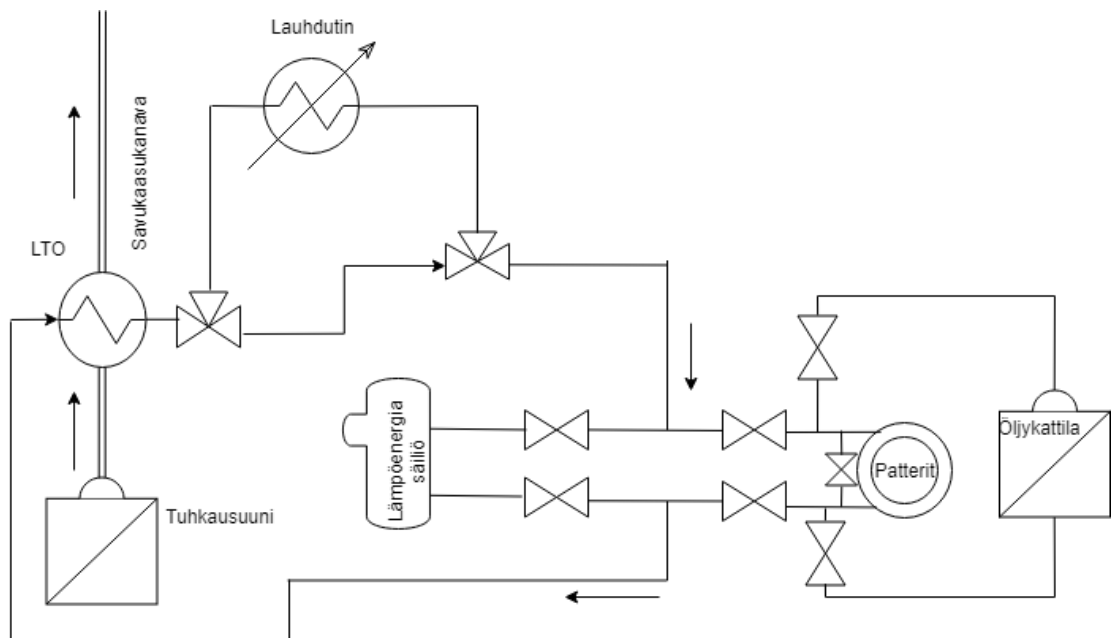
laskun johdosta kuuma vesi kohoaa kattilassa ylöspäin tiheämmän viileän veden laskeutuessa kattilan pohjalle.

3.4 Säteily

Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, jota lähettää jokainen kappale tuottaa lämpötilansa perusteella (Fagerholm 1986). Säteily ei vaadi väliainetta lämpöenergian siirtämiseen. Kun lämpösäteilyä osuu kappaleeseen, osa lämpösäteilyn sisältämästä energiasta absorboituu kappaleeseen loppuosan heijastuessa tai kulkeutuessa kappaleen läpi. Lämpösäteilyn absorptioon vaikuttaa kappaleen heijastuvuus eli emissiivisyys. Mitä tasaisempi ja heijastavampi pinta on, sitä vähemmän kappale absorboi lämpösäteilyä. (Fagerholm 1986, 258-259.)

4 LÄMMÖN TALTEENOTTOJÄRJESTELMÄN TOIMINTA JA KOMPONENTIT

Kuvassa 6 on esitettyä lämmön talteenotto- ja lämpöenergianvarastointijärjestelmästä, mikä on liitetty olemassa olevaan lämmitysjärjestelmään.



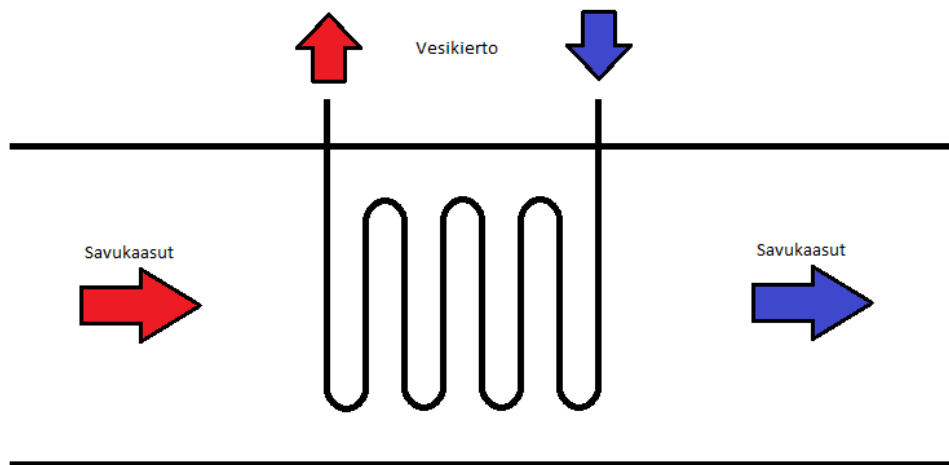
Kuva 6. Piirros lämmöntalteenottolaitteiston virtauskaavio

Lämmönvaihtimen toimintaperiaate

Lämmönvaihtimia käytetään siirtämään lämpöenergiaa erilämpötiloissa olevien kaasujen tai nesteiden välillä. Tarkoituksena on yleensä siirtää energiaa muualle hyödynnettäväksi tai energian siirtämiseksi pois prosessista.



Kuva 7. Espoon krematorion lämmönvaihdin



Kuva 8. Lämmön talteenottolaitteen toiminta kuvana

Lämmönsiirron esimerkissä (Kuva 8) virtaava savukaasu luovuttaa lämpöenergiaansa vesikiertoon. Tämän seurauksena vesikierto piirin lämpötila nousee ja savukaasujen lämpötila laskee. Lämmönvaihdon tehokkuus kasvaa lämmönsiirtoon käytetyn pinta-alan kasvaessa. Mitä pienempi on kuuma-vesipiirin ja kylmävesipiirin lämmönvaihtimen sisäänmeno lämpötilan ero, sitä

pienempi teho saavutetaan. Mitä suurempi on savukaasujen ja vesikierron lämpötila ero, sitä tehokkaammin lämpöenergia siirtyy vesipiiriin.

Tämä ilmiö selittyy termodynamiikan toisen pääsäännön avulla. Mitä suurempi entropiaero eri järjestelmien välillä on, sitä voimakkaammin systeemi yrittää löytää termodynaamisen tasapainotilan.

Kuvassa 9. on esitelty lämmönvaihtimen piirrosmerkki.



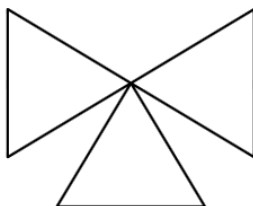
Kuva 9. Lämmönvaihtimen piirrosmerkki

Sekoitusventtiili

Sekoitusventtiiliä (kuva 10) käytetään sekoittamaan kahden eri putkilinjan nestevirtaukset. Tätä ratkaisua käytetään yleisesti nesteen lämmönsäätelyyn. Venttiilin asentoa säädetään lämmönsäätäjällä eli toimilaitteella, jota ohjataan veden lämpötilaohjauksella.



Kuva 10. Esimerkikuvasta sekoitusventtiilistä



Kuva 11. Sekoitusventtiilin piirrosmerkki

Lämmönsäädin

Kyseessä on toimilaitteen ja logiikkayksikön yhdistelmä. Logiikka saa mittaus-tiedon lämpötila-anturilta ja säättää toimilaitteen avulla venttiilin asentoa. kuvassa 12 on esimerkki lämmönsäätimestä



Kuva 12. Esimerkkikuva lämmönsäätimestä

Kiertovesipumppu

Kiertovesipumppua (kuva 13) käytetään liikuttamaan putkissa olevaa nestettä. Kiertovesipumppuja on monenlaisia. Aikaisempina vuosikymmeninä kierto-vesipumppuina käytettiin kiinteäpainepumppuja, mutta nykyään käytettävät pumpput ovat joko taajuusmuuttajaohjattuja tai mekaanisesti itse säätyviä. Taa-juusmuuttaja pumppujen ohjauksessa voidaan lähtökohtaisesti käyttää paine-ja/tai lämpötilaohjausta.



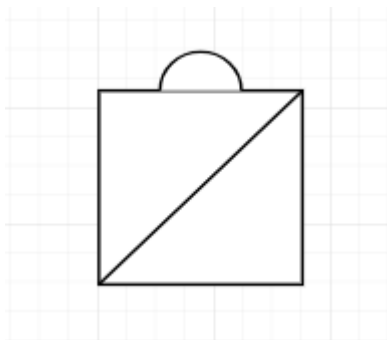
Kuva 13. Esimerkkikuva kiertovesipumpusta

Öljykattila

Öljykattilaa käytetään Parikan kappelissa tuottamaan lämpöä sekä lämmintä käyttövettä.



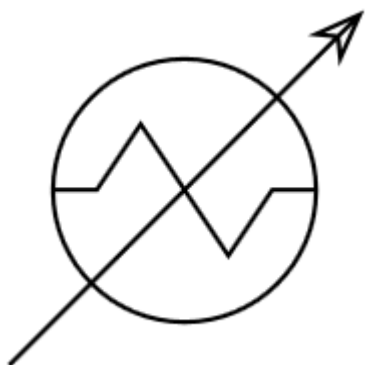
Kuva 14. Parikan kappelin öljykattila



Kuva 15. Kappelin lämmitykseen käytettävän öljykattilan ja krematorion piirrosmerkki

Lauhdutin

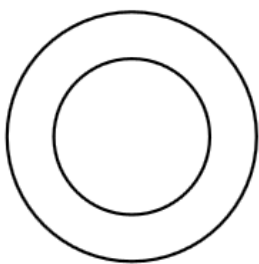
Lauhdutinta käytetään silloin, kun krematorion lämmöntuotto ylittää sekä lämpöpatterin että kappelin lämmöntarpeen. Tämä on tärkeää, koska lämmön talteenottojärjestelmän veden lämpötila ei saa ylittää kiehumispistettä ja koska näin saadaan savukaasujen loppulämpötila halutuksi. Mikäli veden lämpötila lämmön talteenottojärjestelmässä saavuttaa kiehumispisteen, syntyy vesihöyryä ja sitä kautta painetta, jota järjestelmä ei rakenteellisesti kestä. Lauhdutin koostuu jäähdytyskennoista sekä puhaltimista. Lauhduttimessa kuuma-vesi johdetaan jäähdytyskennoihin, joista lämpöenergia siirretään puhaltamalla ilmaan kennon läpi, eli konvektion avulla ulkoilmaan. Lauhdutin tulee mitoittaa vastaamaan lämmön vaihtimen teholtaan lämmönsiirtimen tehoa.



Kuva 16. Lauhduttimen piirrosmerkki

Patteriverkko

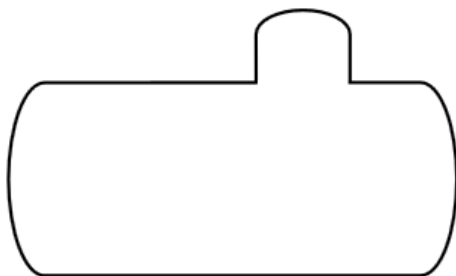
Patteriverkko pitää sisällään kaikki patterit ja lämmittimet, jotka saavat lämpöenergiansa keskuslämmityksestä (öljykattilasta).



Kuva 17. Patteriverkon piirrosmerkki

Vesisäiliö

Vesisäiliö toimii Kymen krematorion lämmöntalteenottojärjestelmän tapauksessa lämpöenergasäiliönä. Tuhkausuunilta kerättävää lämpöenergiaa varastoidaan säiliön veteen. Valmistaja on antanut maksimilämpötilaksi noin 100°C ja maksimi paineeksi 1 baarin.



Kuva 18. Vesisäiliön piirrosmerkki

5 SELVITYSTYÖ JA DATAN KERÄÄMINEN

Tämän opinnäytetyön tiedot ja lämmöntalteenoton suunnittelut pohjautuvat materiaaliin ja tietoihin, jotka olen tutkimuksillani, haastatteluilla sekä Kymilabsin toteuttamaan päästömittausraporttiin Kymen krematoriosta.

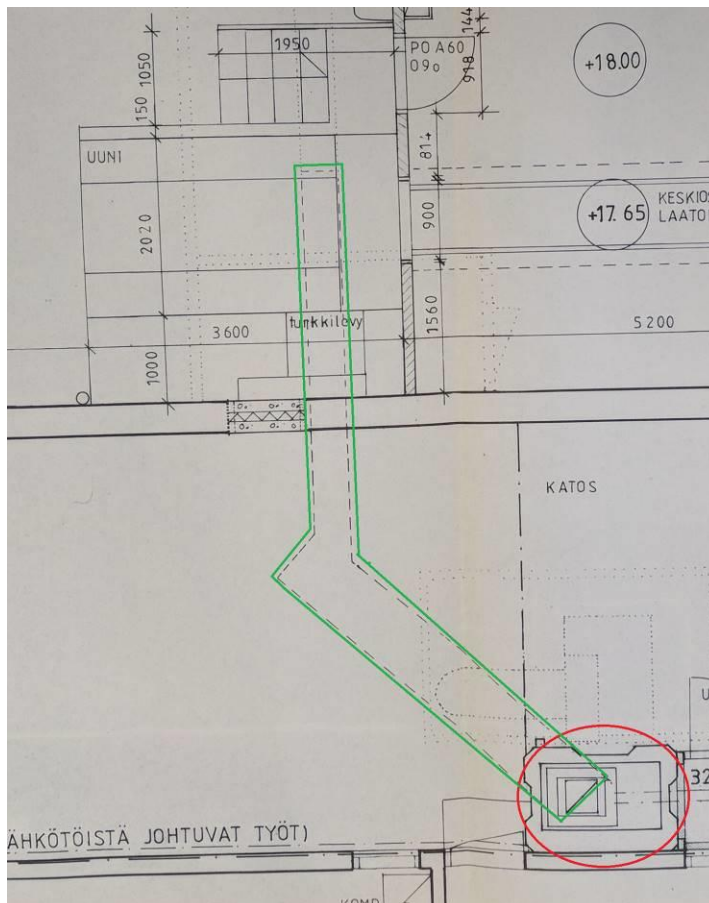
Pohjatiedot Parikan kappeliin ja Kymen krematorioon sain osana Energiategohokkuuskurssilla ryhmätyönä tekemääni energikatselmusta. Energiakatselmuksen tehtävänä oli selvittää mm. kappelin sekä krematorion nykyinen energiankulutus ja selvittää tapoja vähentää energiankulutusta ja saada siten aikaiseksi säästöjä. Katselmuksen aikana huomio kiinnittyi huomattavan suureen öljynkulutukseen, niin kappelissa kuin krematoriossa. Koska kappeli on rakennettu 1960-luvulla ja ennen vuoden 1973 öljykriisiä, on kappelin lämpöeristykset nykymittapuulla huonot. Muun muassa tästä johtuen kappelin lämmittämiseen kuluu huomattava määrä energiaa. Vuonna 2016 lämmitykseen käytettiin n. 38 m^3 kevyttä poltto-öljyä, mikä energialtaan vastaa 380 MWh. Suunniteltaessa lämmöntalteenottoa on kerättävälle lämpöenergialle oltava kulutuskohde. Koska kappelin lämmitysenergian kulutus on huomattavaa, on energiantehokkuuden nimissä luontevaa käyttää savukaasujen energiaa lämmitykseen. On kuitenkin muistettava, että lämmöntalteenoton päätehtävänä on madaltaa krematorion savukaasujen lämpötilaa, jotta savukaasujen päästöjä voidaan vähentää.

Toukokuussa 2015 Kymenlaakson Ammattikorkeakoulu Oy:n Kymilabs / Päästömittauspalvelut, suorittivat päästömittaukset Kymen krematoriolla. Mittausten tarkoituksena oli selvittää tuhkausuunin savukaasupäästöt. Mittausjakson aikana suoritettiin 5 tuhkausta. Päästömittaukset suoritettiin polttouunin ja ejektoripuhaltimen jälkeen savupiipusta n.10 metrin korkeudesta. Savukaasumääräksi mitattiin hetkellisesti $1 - 4 \text{ m}^3(\text{n})/\text{s}$.

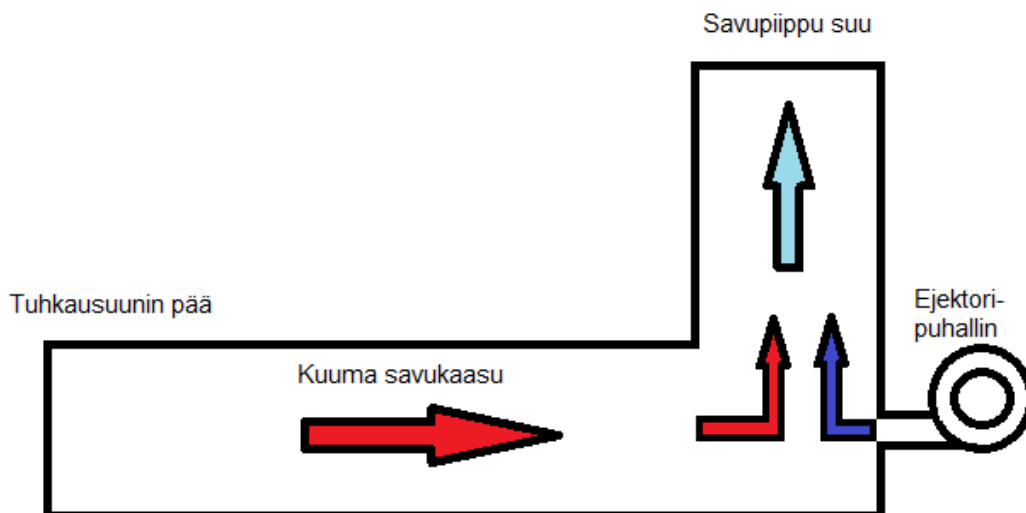


Kuva 19. Krematorio ulkopuolelta

Kuvassa 19 näkyy itse krematorio rakennus ja savupiippu. Kuvassa 20 näkyy savukaasukanavan sijainti maan sisällä.

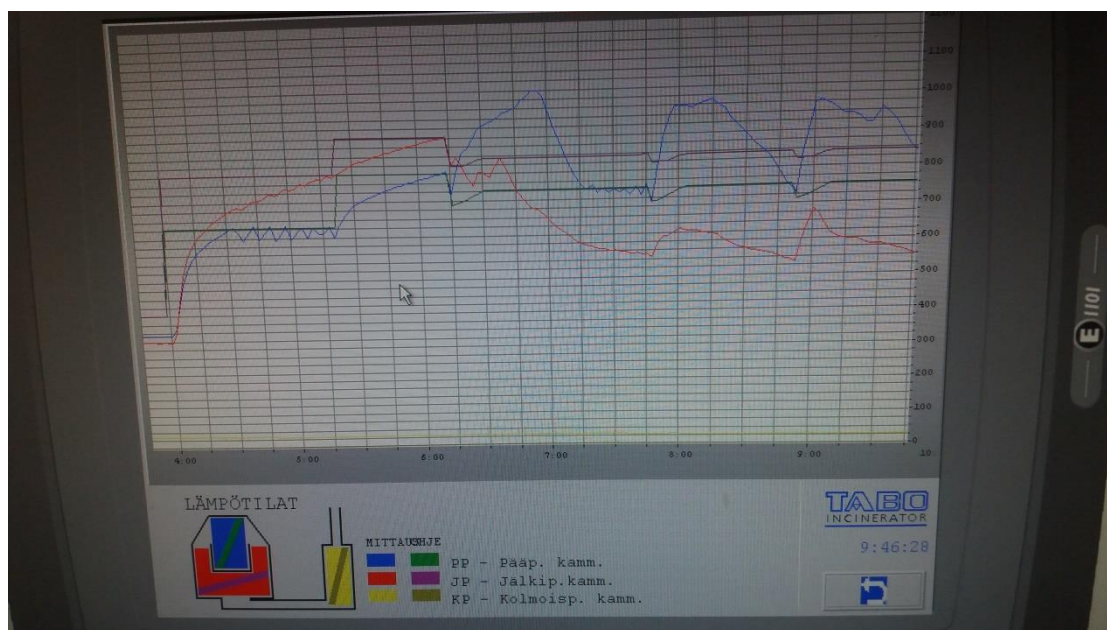


Kuva 20. Savukaasukanavan (vihreä), sekä savupiipun sijainti (punainen)



Kuva 21. Havainnekuva savukaasukanavasta

Kymen krematorion tapauksessa savukaasujen lämpötilan ja määrän mittaaminen on ongelmallista useasta syystä. Kuten kuvasta 19 ja kuvasta 20 on nähtävissä, savukaasukanava kulkee maan sisällä savupiipulle ja koska erillisiä mittaussyhteitä ei ole, savukaasujen lämpötila on mahdollista mitata vain savupiipun päästä. Savupiipun päästä mittaamisessa ongelmaksi muodostuu se, että savukaasukanavaan syötetään raitista ilmaa ejektoripuhaltimella (kuva 21). Ejektoripuhaltimen tarkoituksena on synnyttää kanavan tuhkausuunin päähän alipainetta ja sitä myöten vetoa, joka on tärkeää palamisprosessin kannalta. Koska savukaasukanavaan syötetään kylmää ilmaa, on käytännössä mahdotonta selvittää tuhkauksesta syntyvien savukaasujen lämpötilaa sekä tilavuusvirtaa ejektoripuhaltimen jälkeen. Tarkan lämpötiladatan saamiseksi, olisi lämpötila-anturi asennettava lähellä tuhkausuunia. Johtuen savukaasukanavan sijainnista sekä savukaasujen korkeista lämpötiloista, anturin asentaminen vaatisi tuhkausuunin jäähtymistä sekä kanavan rakenteiden avaamista. Vuoden 2017 kesällä savukaasukanavan jouduttiin muuraamaan uudelleen ja krematorion toiminta oli tällä välin tauolla, mutta valitettavasti suuria lämpötiloja kestävästä anturista ei ollut saatavilla mittauksiin kyseisenä ajankohtana.



Kuva 22. Krematorion hallintajärjestelmän lämpötila loki

Lämpötiladataa krematorion toiminnasta oli mahdollista saada vain vanhoina paperitulosteina, sillä krematorion nykyisestä hallintajärjestelmästä (kuva 22) ei ole mahdollista kerätä lokitietoja, koska laitteisto ei tallenna ja ylläpidä dataa. Koska dataa tuhkausuunin toiminnasta oli mahdotonta saada, jouduin turvautumaan tulosteisiin vuosilta 1999 – 2003, ajalta ennen kuin Krematorion hallintalaitteisto uudistettiin nykyiseen. Koska uudistuksessa muutettiin vain hallintalaitteisto, ovat tulosteet vielä nykyäänkin relevantteja.

Taulukko 1 Lämpötiladatan lämpötilajakauma

Jälkipolton lämpötila	Pisteiden lukumäärä	Prosentteina
>1100°C	16	1,17 %
1000 - 1100 °C	21	1,54 %
900 - 1000 °C	75	5,51 %
800 - 900 °C	404	29,66 %
700 - 800 °C	733	53,82 %
600 - 700°C	67	4,92 %
<600°C	46	3,38 %
Yhteensä	1362	100 %

Kuten datasta voidaan päätellä (taulukko 1), ollessaan päällä tuhkausuunin lämpötila on 91,7 % ajasta yli 700 °C ja 83,48 % ajasta 700 – 900 °C. Vaikka emme voi tietää savukaasujen tarkkaa lämpötilaa, voimme kuitenkin tehdä vahvan oletuksen siitä, että savukaasujen lämpötila lienee hyvin lähellä jälkipolton lämpötilaa, sillä savukaasut poistuvat jälkipoltto-osuuden jälkeen. Li-

säksi tuhkausuunien rakenne on hyvin yhtenäinen, mistä voidaan tehdä oletus siitä, että todennäköisesti savukaasujen lämpötila ei voi erota huomattavasti muiden tuhkausuunien savukaasujen lämpötilasta. Turun esimerkin uusissa suunnitelmissa savukaasujen lämpötilaksi on mitoitettu 700 °C, kun taas Espoon krematorion savukaasujen lämpötilaksi on julkisesti ilmoitettu 600 °C.

Taulukko 2 Yhden tuhkauksen kuluttama öljymäärä

Vuoden 2016 tuhkaukset	
Tuhkauksia	1400 kpl
Öljyä kului	41387 l
Öljyä keskim. Kulutus	29,6 l/tuhkaus

Vuonna 2016 tuhkauksia oli Kymen krematoriolla 1400 kpl (Malinen 2018) ja öljyä niiden suorittamiseen kului 41 387 litraa. Tämä tarkoittaa, että öljyä kului 29,6 l tuhkausta kohti. (taulukko 2) Tämä ei kuitenkaan anna tarkkaa kokonaiskuvaa, sillä käyttäjäkokemukset mukaan öljyä kuluu loppupäivästä huomattavasti vähemmän kuin aamupäivästä. Tämä johtuu siitä, että päivän aikana tuhkausuuniin rakenteisiin varastoituu lämpöenergiaa. Tämä vähentää poltettavan öljyn määrää, ja tuhkausuuni voidaan pitää halutussa lämpötilassa. Haastatteluissa arvioitiin aamupäivästä kuluvan öljyä 26 l/tuhkaus, mikä vähenee 10 litraan tuhkausta kohti iltapäivällä.

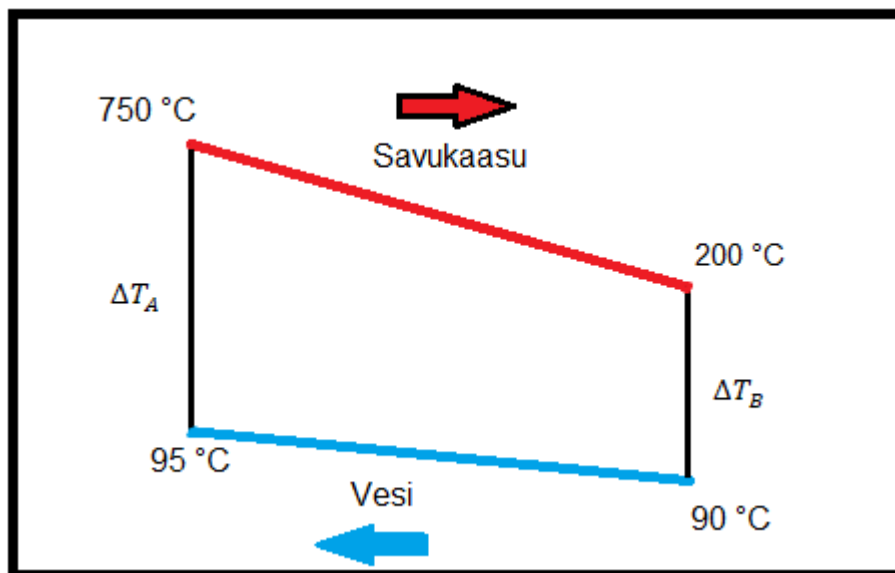
6 LÄMMÖNSIIRTIMEN MITOITUS

Lämmönsiirtimen mitoituksessa on tehtävä muutamia oletuksia, johtuen siitä että savukaasujen lämpötilaa eikä virtausta ei ole voitu selvittää. Lämmönsiirrin toimii vastavirtaperiaatteen mukaisesti, koska veden virtaussuunta on päinvastainen savukaasujen virtaukseen nähden. Lämmön siirtyminen on tehokkainta, kun lämpötilaero on suurimmillaan.

Koska savukaasukanava sijaitsee maan sisällä, on otettava huomioon lämmönsiirtimen likaantuminen ja sitä kautta tarve sen puhdistamiselle. Siksi tässä opinnäytetyössä mitoitettu/esitetty lämmönvaihtimen rakenne on pelkistetty ja koostuu suorista ruostumattomista teräsputkista.

Logaritminen lämpötilaero

Keskimääräinen lämpötilaero savukaasun ja veden välillä voidaan laskea joko aritmeettisena tai logaritmisena. Logaritminen lämpötilaero on näistä laskumenetelmistä tarkempi ja vastaa paremmin lämpötilan käyttäytymistä.



Kuva 23. Lämpötilan muutokset lämmönvaihtimessa

Logaritmisien lämpötilaeron laskemiseen voidaan käyttää kaavaa (Wagner 1994,154)

$$\Delta T_{log} = \frac{\Delta T_A - \Delta T_B}{\ln \frac{\Delta T_A}{\Delta T_B}} \quad (2)$$

jossa	ΔT_{log}	logaritminen lämpötilaero	[°C]
	ΔT_A	virtojen lämpötilaero lämmönvaihtimen alkupäässä	[°C]
	ΔT_B	virtojen lämpötilaero lämmönvaihtimen loppupäässä	[°C]

Savukaasujen lämpötiloista tiedämme, että savukaasujen lämpötila pitää laskea 200 °C:seen savukaasujen puhdistuslaitteistojen toiminnan mahdollistamiseksi. On myös tiedossa, että vastaavissa muissa tuhkausuuneissa savukaasujen lämpötila on 600–700 °C ja myös se että 83,48 % ajasta Kymen krematorion tuhkausuuninlämpötila on 700–900 °C. Ilman tarkempia lämpöti-

lamittauksia, ja jotta suuntaa antava mitoitus voidaan tehdä, voimme olettaa savukaasujen lämpötilan olevan 750 °C.

Koska lämpöenergiavarastona toimivan säiliö kestää vain n.100 °C lämpötilan sekä yhden 1 barin paineen, on säiliölle tulevan veden turvallinen maksimi-lämpötila 95 °C. Varmistaakseni lämmönvaihtimen pystyvän vielä keräämään energiaa savukaasuista, myös silloin kun lämpöenergiavarasto on melkein täynnä, on mielestäni perusteltua olettaa lämmönvaihtimelle saapuvan veden olevan lähellä lämmönsiirtimeltä säiliölle lähtevän veden lämpötilaa eli 90 °C.

Sijoittamalla lämpötilat kaavaan saamme logaritmiseksi lämpötilaeroksi:

$$\Delta T_{log} = \frac{(750\text{ °C} - 95\text{ °C}) - (200\text{ °C} - 90\text{ °C})}{\ln \frac{(750\text{ °C} - 95\text{ °C})}{(200\text{ °C} - 90\text{ °C})}} = 305,47\text{ °C}$$

6.1 Savukaasuvirran teho

Tarvittavan putkipinta-alan laskemiseksi on ensin selvitettävä lämpöenergiateho, mikä syntyy savukaasujen virtauksesta. Koska savukaasujen tilavuusvirtaa ei ole voitu mittaamalla selvittää, voidaan tehoa yrittää arvioida tuhkausuunissa kuluneesta polttoaineesta, sekä palaneesta orgaanisesta aineesta.

Vuonna 2016 suoritettiin 1 400 kpl (Malinen 2018) tuhkauksia, joihin käytettiin 41 387 litraa kevyttä polttoöljyä. Eli öljyä kului 29,6 litraa (23,68 kg) tuhkausta kohti. Ihmisen ruumiinpainosta on 50 – 70 % vettä. Tämä täytyy ottaa huomioon, kun lasketaan ihmisestä savukaasuihin syntyvää tehoa. Kun ihminen tuhkataan, ihmiseen sitoutunut vesi muuttuu vesihöyryksi ja kulkeutuu savukaasujen mukana savukaasukanavaan. Tämän vesihöyryyn sitoutuneen energian talteen ottaminen vaatisi vesihöyryn lauhduttamista takaisin vedeksi. Koska erillistä lauhdutinta ei ole, vesihöyryyn sitoutunut energia siirtyy lämpöenergiahäviönä taivaalle. Tästä johtuen, ihmisen lämpöarvoa laskiessa tulee käyttää alemman lämpöarvon laskentakaavaa (kaava 3). Täten saadaan ihmisen tehollinen lämpöarvo. Kilossa rasvaa on 7 000 kcal (29,288 MJ/kg). Laskennan yksinkertaistamiseksi oletamme että tuhkattava koostuu vain vedestä ja rasvasta. Ihminen painaa keskimäärin 70 – 85 kg. Tehon mitoittamista var-

ten oletamme että tuhkattava henkilö painaa 75 kiloa, mistä 52,5 kg vettä ja 22,5 kg rasvaa.

Käyttämällä alemman lämpöarvon laskentakaavaa (VTT 2016), voidaan ihmisen lämpöarvo arvioida

$$Q_{net,ihminen} = Q_{net,d} \cdot \frac{100-M}{100} - 0,02443 \cdot M \quad (3)$$

jossa	$Q_{ne,ihminen}$	tehollinen lämpöarvo	[MJ/kg]
	$Q_{net,d}$	kuivan aineen tehollinen lämpöarvo	[MJ/kg]
	M	kokonaiskosteus	[%]
	0,02443	höyrystymisen entalpiain korjauskerroin vedelle 25 °C lämpötilassa, MJ/kg per 1 p-% kosteutta	

$$Q_{net,ihminen} = 29,288 \text{ MJ/kg} \cdot \frac{100 - 70 \%}{100} - 0,02443 \cdot 70 \%$$

$$Q_{net,ihminen} = 7,08 \text{ MJ/kg}$$

Öljyn tiheytenä ja tehollisena lämpöarvoina käytämme taulukoista löytyviä arvoja 0,8 kg/l ja 42,6 MJ/kg. Nyt on mahdollista laskea tuhkauksen aikana savukaasuihin vapautunut energia.

$$Q_{tuhka} = Q_{net,ihminen} \cdot m_{ihminen} + Q_{net,öljy} \cdot m_{öljy} \quad (4)$$

jossa	Q_{tuhka}	tuhkauksessa siirtynyt energia	[MJ]
	$Q_{net,ihminen}$	ihmisen tehollinen lämpöarvo	[MJ/kg]
	$m_{ihminen}$	ihmisen massa	[kg]
	$Q_{net,öljy}$	öljyn tehollinen lämpöarvo	[MJ/kg]
	$m_{öljy}$	öljyn massa	[kg]

$$Q_{tuhka} = 7,08 \text{ MJ/kg} \cdot 75 \text{ kg} + 42,6 \text{ MJ/kg} \cdot 23,68 \text{ kg}$$

$$Q = 1\,557,18 \text{ MJ}$$

Krematorion työntekijöiden haastattelujen perusteella tuhkaus kestää yhdestä kahteen tuntia (Malinen 2018), mikä tarkoittaa keskiarvona 1,5 tuntia, eli 5 400 sekuntia, per tuhkaus. Jakamalla vapautuneen energiamäärän ajalla saamme laskettua tehon.

$$\phi_{sv} = \frac{Q_{tuhka}}{t} \quad (5)$$

jossa	ϕ_{sv}	savukaasujen teho	[MW]
	Q_{tuhka}	savukaasuihin siirtynyt energia	[MJ]
	t	tuhkaukseen kulunut aika	[s]

$$\phi_{sv} = \frac{1\,557,18\text{ MJ}}{5\,400\text{ s}}$$

$$\phi_{sv} = 0,285\text{ MW}$$

6.2 Lämmönvaihtimen tehon mitoitus

Koska savukaasuja ei jäähdytetä ulkoilman lämpötilaan, on savukaasuihin vielä sitoutuneena huomattava osa savukaasujen lämpöenergiasta. Voidakseen selvittää lämmönvaihtimen teho tulee savukaasujen kokonaistehosta vähentää se osa, joka jatkaa lämmönvaihtimen jälkeen savupiipun kautta ulkoilmaan. Lämmönvaihtimen aiheuttamasta lämpötilamuutoksesta suhteessa 750 °C lämpötilaan, saadaan kerroin, jota voidaan käyttää lämmönvaihtimen tehon laskemiseen. Kerroin k_{sv} voidaan täten laskea kaavalla

$$k_{sv} = \frac{\Delta T_{lto}}{T_{ennen}} \quad (6)$$

jossa	k_{sv}	savukaasujen lämpötilojen muutoskerroin	[-]
	ΔT_{lto}	lämmönsiirtimessä tapahtunut lämpötilan muutos	[°C]
	T_{ennen}	savukaasujen lämpötila niiden tullessa lämmönvaihtimelle	[°C]

$$k_{sv} = \frac{(750\text{ °C} - 200\text{ °C})}{750\text{ °C}}$$

$$k_{sv} = 0,733$$

Lämmönvaihtimen tehon laskemiseen voidaan käyttää kaavaa

$$\phi_{lto} = k_{sv} \phi_{sv} \quad (7)$$

jossa	ϕ_{lto}	lämmönvaihtimen teho	[MW]
	k_{sv}	savukaasuissa tapahtunut lämpötilamuutos	[-]
	ϕ_{sv}	savukaasujen teho	[MW]

$$\phi_{lto} = 0,733 \cdot 0,285 \text{ MW}$$

$$\phi_{lto} = 0,209 \text{ MW}$$

6.3 Tarvittava putkipinta-ala

Lämmönsiirtimen rakenne koostuu putkista, joiden sisällä virtaa savukaasuja kylmempi vesi. Putkiston yhteenlasketun pinta-alan täytyy olla riittävän suuri, jotta lämpöenergia ehtii siirtymään savukaasuista putkissa virtaavaan veteen. Lämmönsiirtimen tarvitsema putkipinta-ala voidaan selvittää käyttämällä kaavaa

$$\phi = A_{putki} k \Delta T_{log} \quad (8)$$

jossa	ϕ	teho	[W]
	A_{putki}	Tarvittava pinta-ala	[m ²]
	k	kokonaislämmönsiirtymiskerroin	[W/m ² °C]
	ΔT_{log}	Logaritminen lämpötilaero	[°C]

Joka voidaan johtaa muotoon

$$A = \frac{\phi}{k \Delta T_{log}}$$

Sijoittamalla aikaisemmin lasketut arvot kaavaan saadaan putkiston pinta-alaksi:

$$A_{putki} = \frac{209\,067\,W}{30\,W/m^2\,^{\circ}C \cdot 305,5\,^{\circ}C}$$

$$A_{putki} = 22,8m^2$$

6.4 Tarvittava putken kokonaispituus

Putkien vaadittu kokonaispituus voidaan laskea kaavalla. Putkeksi on valittu DN40, minkä ulkomitta on 0,04826 m ja seinämävahvuus 0,00277 m

$$l_{kok} = \frac{A_{putki}}{\pi D} \quad (9)$$

jossa	l_{kok}	tarvittava putken kokonaispituus	[m]
	A_{putki}	putken vaadittu pinta-ala	[m ²]
	D	putken valitun putken ulkohalkaisija	[m]

$$l = \frac{22,8\,m^2}{\pi \cdot 0,04826\,m}$$

$$l = 150,47\,m$$

6.5 Savukaasun tiheyden laskeminen

Savukaasujen tiheys voidaan laskea johtamalla kaava ideaalikaasun tilayhtälöstä muotoon (Valtanen 2012, 238),

$$\rho_{sv} = \frac{\rho}{RT} \quad (10)$$

jossa	p	paine	[Pa]
	ρ_{sv}	savukaasun tiheys	[kg/m ³]
	R	ilman kaasuvakio	[J/kgK]
	T	savukaasun keskimääräinen jäähdytys	[K]

Ilman kaasuvakioksi merkitään 287 J/kg·K (Heat Atlas, 1993, 172). Savukaasun keskimääräinen jäähtymä lasketaan lämmönvaihtimessa tapahtuneen muutoksen keskimääräisen lämpötilan mukaan. Savukaasujen tiheys muuttuu lämpötilan mukaan, mutta käyttämällä jäähtymisen keskimääräistä lämpötilaa saadaan savukaasujen tiheydestä laskennallisesti hyödyllinen arvio.

$$\rho = \frac{p}{RT}$$

$$\rho_{sv} = \frac{100\,000\text{ Pa}}{289\text{ J/kg K} \cdot \left(\frac{1023,15 + 473,15}{2}\right)\text{ K}}$$

$$\rho_{sv} = 0,4625\text{ kg/m}^3$$

6.6 Savukaasujen virtaus

Koska savukaasukanavaan asennettavat putket haittaavat savukaasujen virtausta, tulee savukaasujen virtausnopeuden olla riittävän suuri (10 m/s). Virtausnopeuden laskemiseksi pitää ensin selvittää savukaasujen tilavuusvirta ja tilavuusvirran selvittämiseksi täytyy selvittää massavirta. Savukaasujen ominaislämpökapasiteetti on 1,1 kJ/kg°C ja tiheys 0,4625 kg/m³. Massavirta on mahdollista saada laskettua kaavasta johtamalla

$$\phi = q_m C_p \Delta T \quad (11)$$

$$q_m = \frac{\phi}{C_p \Delta T}$$

jossa	ϕ	savukaasun teho	[kW]
	q_m	savukaasun massavirta	[kg/s]
	C_p	savukaasun ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kg°C]
	ΔT_{lto}	lämmönsiirtimessä tapahtunut lämpötilan muutos	[°C]

$$q_m = \frac{285,1\text{ kW}}{1,1\text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \cdot 550^\circ\text{C}}$$

$$q_m = 0,471 \text{ kg/s}$$

Tilavuusvirta on mahdollista johtaa kaavasta

$$q_m = \rho q_v \quad (12)$$

jossa	q_m	savukaasun massavirta	[kg/s]
	ρ_{sv}	savukaasun tiheys	[kg/m ³]
	q_v	savukaasun tilavuusvirta	[m ³ /s]

$$q_v = \frac{q_m}{\rho_{sv}}$$

$$q_v = \frac{0,471 \text{ kg/s}}{0,4625 \text{ kg/m}^3}$$

$$q_v = 1,0189 \text{ m}^3/\text{s}$$

Savukaasujen virtaukselle tarvittava pinta-ala saadaan johdettua kaavasta

$$q_v = w A_{sv} \quad (13)$$

jossa	q_v	savukaasun tilavuusvirta	[m ³ /s]
	w	savukaasun virtausnopeus	[m/s]
	A_{sv}	savukaasujen tarvitsema pinta-ala	[m ²]

$$A_{sv} = \frac{q_v}{w}$$

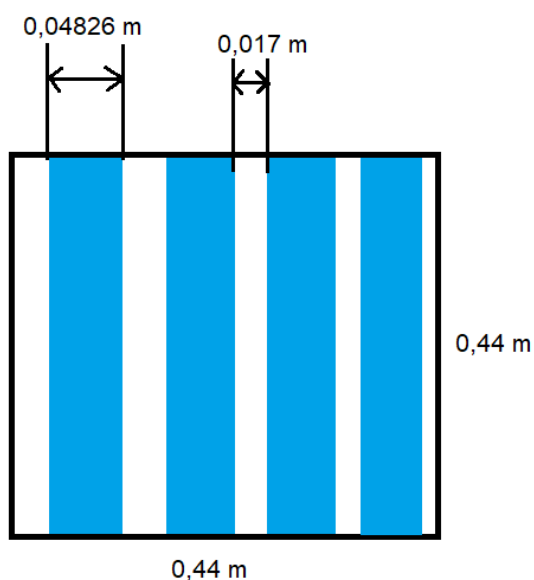
$$A_{sv} = \frac{1,0189 \text{ m}^3/\text{s}}{10 \text{ m/s}}$$

$$A_{sv} = 0,1019 \text{ m}^2$$

Tuhkausuunin savukaasukanava on teknisten piirrosten mukaan 0,44 m korkea ja 0,44 metriä leveä (0,1936 m²). Savukaasujen vaatimasta pinta-alasta johtuen (0,1019 m²), savukaasukanavasta voi hyödyntää vain 0,0917 m².

6.7 Putkirivien määrä ja pituus

Laskettaessa savukaasukanavaan mahtuvien rinnakkaisten putkien määrä, on otettava huomioon, että savukaasukanavasta on hyödynnettävissä vain 0,0917 m². Rinnakkain olevien putkien lukumäärän laskemiseksi täytyy ensin laskea yhden putken virtauspinta-ala, jonka jälkeen hyödynnettävissä oleva pinta-ala voidaan jakaa putkien virtauspinta-alalla.



Kuva 24. Havainnekuva lämmönsiirtimen putkista. (Edestä katsottuna)

Yhden putken virtauspinta-ala voidaan laskea käyttämällä kaavaa

$$A_{\text{yksi putki}} = D \cdot h_{\text{kanava}} \quad (14)$$

jossa	$A_{\text{yksi putki}}$	yhden putken virtauspinta-ala	[m ²]
	D	valitun putken halkaisija	[m]
	h_{kanava}	savukaasukanavan korkeus	[m]

$$A_{\text{yksi putki}} = 0,04826 \text{ m} \cdot 0,44 \text{ m}$$

$$A_{\text{yksi putki}} = 0,0212 \text{ m}^2$$

Jakamalla käytettävissä oleva pinta-ala yhden putken virtauspinta-alalla saadaan tulokseksi savukaasukanavaan mahtuvien putkirivien määrä.

$$X_{putki} = \frac{A_{käy}}{A_{yksi\ putki}} \quad (15)$$

jossa	X_{putki}	putkirivien lukumäärä	[kpl]
	$A_{käy}$	kanavan käytettävissä oleva pinta-ala	[m ²]
	$A_{yksi\ putki}$	yhden putken virtauspinta-ala	[m ²]

$$X_{putki} = \frac{0,0917\ m^2}{0,0212\ m^2}$$

$$X_{putki} = 4$$

Putkirivien välinen etäisyys toisistaan saadaan jakamalla savukaasujen tarvitsema pinta-ala putkirivien määrällä, johon on lisätty 2 (reunimmaisten putkien ja seinänsivälinen alue). Savukaasujen on mahdollista virtaamaan putken molemmilta puolilta.

$$X_{rivien\ väli} = \frac{A_{sv}}{X_{putki} + 2} \quad (16)$$

jossa	$X_{rivien\ väli}$	putkirivien välinen etäisyys	[m]
	A_{sv}	savukaasujen tarvitsema pinta-ala	[m ²]
	X_{putki}	putkirivien lukumäärä	[kpl]

$$X_{rivien\ väli} = \frac{0,1019\ m^2}{4\ kpl + 2}$$

$$X_{rivien\ väli} = 0,0167\ m$$

Yhden putkirivin pituus saadaan laskettua jakamalla tarvittavan putken kokonaispituus putkirivien lukumäärällä

$$l_{rivi} = \frac{l_{kok}}{X_{putki}} \quad (17)$$

jossa	l_{rivi}	putkirivin pituus	[m]
	l_{kok}	tarvittava putken kokonaispituus	[m]
	X_{putki}	putkirivien lukumäärä	[kpl]

$$l_{rivi} = \frac{150,47 \text{ m}}{4 \text{ kpl}}$$

$$l_{rivi} = 37,62 \text{ m}$$

6.8 Putkikoon valinta ja vesipiirin mitoitus

Putkikoon valinnassa yksi tärkeimmistä mitoitusperusteista on painehäviö. Painehäviön minimoimiseksi vedenvirtausnopeus lämmönvaihtimen putkistossa ei saa ylittää 2 m/s. Putkikooksi valikoitui laskennan jälkeen DN 40, minkä ulkohalkaisija on 48,26 mm ja seinämävahvuus on 2,77 mm. Putkistossa virtaavan veden nopeuden selvittämiseksi tulee ensin laskea virtaavan veden massavirta, joka voidaan johtaa kaavasta:

$$\phi_{lto} = q_{m,vesi} \cdot c_{p,vesi} \cdot \Delta T \quad (18)$$

jossa	ϕ_{lto}	lämmönvaihtimen teho	[kW]
	$q_{m,vesi}$	veden massavirta	[kg/s]
	$c_{p,vesi}$	veden ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kg°C]
	ΔT	vedenlämpötilan muutos vaihtimessa	[°C]

$$q_{m,vesi} = \frac{\phi_{lto}}{c_{p,vesi} \cdot \Delta T}$$

$$q_{m,vesi} = \frac{209 \text{ kW}}{4,19 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \cdot (95^\circ\text{C} - 90^\circ\text{C})}$$

$$q_{m,vesi} = 9,98 \text{ kg/s}$$

Yhdessä putkessa virtaava massavirta saadaan jakamalla veden massavirta putkirivien lukumäärällä.

$$q_{m,putki} = \frac{q_{m,vesi}}{X_{putki}} \quad (19)$$

jossa	$q_{m,putki}$	yhden putken veden massavirta	[kg/s]
	$q_{m,vesi}$	veden massavirta	[kg/s]
	X_{putki}	veden ominaislämpökapasiteetti	[kpl]

$$q_{m,putki} = \frac{9,98 \text{ kg/s}}{4 \text{ kpl}}$$

$$q_{m,putki} = 2,49 \text{ kg/s}$$

Veden tilavuusvirran laskemiseksi voidaan käyttää kaavaa

$$q_{m,putki} = q_{v,putki} \cdot \rho_{vesi,95^{\circ}C} \quad (20)$$

jossa	$q_{m,putki}$	yhden putken veden massavirta	[kg/s]
	$q_{v,putki}$	yhden putken veden tilavuusvirta	[m ³ /s]
	$\rho_{vesi,95^{\circ}C}$	veden vedentiheys 95 °C lämpötilassa	[kg/m ³]

$$q_{v,putki} = \frac{q_{m,putki}}{\rho_{vesi,95^{\circ}C}}$$

$$q_{v,putki} = \frac{2,49 \text{ kg/s}}{965,3 \text{ kg/m}^3}$$

$$q_{v,putki} = 0,0026 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tilavuusvirran avulla on mahdollista laskea veden virtausnopeus yhdessä putkessa käyttämällä kaavaa.

$$q_{v,putki} = w A_{vesiputki} \quad (21)$$

jossa	$q_{v,putki}$	yhden putken veden tilavuusvirta	[m ³ /s]
-------	---------------	----------------------------------	---------------------

w	veden virtausnopeus	[m/s]
$A_{vesiputki}$	yhden putken veden virtauksen pinta-ala	[m ²]

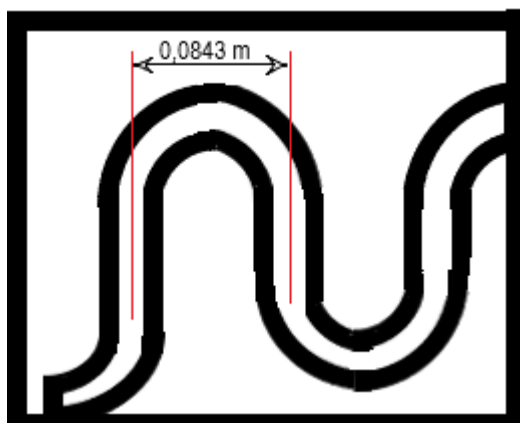
$$w = \frac{q_{v,putki}}{A_{vesiputki}}$$

$$w = \frac{0,0025 \text{ m}^3/\text{s}}{\frac{\pi}{4} \cdot (0,0427 \text{ m})^2}$$

$$w = 1,80 \text{ m/s}$$

Mikäli käytettäisiin DN 32 putkea, veden virtaus olisi 2,45 m/s, mikä kasvattaisi virtaushäviöitä huomattavasti.

6.9 Lämmönsiirtimen pituus



Kuva 25. Havainnekuva lämmönsiirtimen putkista savukaasukanavassa. (sivulta)

Kukin putkirivi on taivutettu "kiepeille" niin että sivusta katsoen putken profiili on aaltomainen. Tämän tarkoituksena on tehdä lämmönsiirtimestä fyysisesti pienempi. Jokainen putki pituussuunnassa on putken halkaisijan (0,04216 m) etäisyydellä toisistaan. Etäisyys voidaan siis laskea käyttäen yhtälöä

$$l_{lto} = \frac{l_{rivi}}{h_{kanava}} \cdot D_{etäisyys} \quad (22)$$

jossa	l_{lto}	lämmönvaihtimen pituus	[m]
	l_{rivi}	putkirivin pituus	[m]
	h_{kanava}	savukaasukanavan korkeus	[m]

$$l_{lto} = \frac{37,62 \text{ m}}{0,44 \text{ m}} \cdot 0,04826 \text{ m}$$

$$l_{lto} = 8,25 \text{ m}$$

6.10 Energiansäästö

Vuonna 2016 Parikan kappelin lämmittämiseen käytettiin 37 920 litraa kevyttä polttoöljyä. Kun otetaan huomioon öljykattilan hyötysuhde n. 95 %, kappelin lämmittämiseen käytettiin 361 MWh energiaa. Käyttämällä Ilmatieteenlaitoksen sivuilta löytyvää pdf-tiedostoa "Ulkoilman lämpötilojen esiintymistiheys nykyilmastossa (TRY2012) pysyvyysarvoina vyöhykkeillä I-II (Vantaa), voidaan laskea tarvittava lämmitysteho suhteessa ulkolämpötilaan. Tästä pdf-tiedostosta löytyy tuntijakauma vuoden aikana esiintyvistä lämpötiloista. Lämmitysenergian kulutus Parikan kappelissa eri ulkolämpötiloille on laskettu liitteen 2 taulukossa.

Selite liitteen 2 soluille:

Q [MWh]

Kokonaisvuosienergiakulutus tietyllä ulkoilman lämpötilalla

P [kW]

Lämmityksen vaatima teho tietyllä ulkoilman lämpötilalla

Ulkoilma [°C]

Ulkoilman lämpötila

Lämpötilan pysyvyys

Lämpötilan kumulatiivinen pysyvyysarvo eli kuinka ison osan vuodesta on ollut yhtä lämmintä tai kylmää.

Δ Lämpötilan pysyvyys

Muutos, joka on tapahtunut verrattuna edelliseen kumulatiiviseen pysyvyysarvoon. Muutosarvolla saadaan laskettua kuinka ison osan vuodesta on ollut tiettyä lämpötilaa.

h/h_a

Lämmön pysyvyys tunteina, eli kuinka monta tuntia vuodesta on ollut tiettyä lämpötilaa.

Jäännösteho

Vaaditun lämmitystehon ylittävä osuus.

Tuhkausuunien käyttö tuottaa huomattavia määriä ylimääräistä energiaa.

Lämpöenergian talteenotto ja uudelleen käyttäminen rakennuksen lämmitykseen on sinänsä melko suoraviivaista ja yksinkertaista. Kaksi suurinta ongelmaa Kymen krematorion tapauksessa ovat: 1. tuhkausuuni toimii vain osan päivästä ja 2. mitä tehdä ylimääräiselle energialle. Täytyy muistaa, että lämmöntalteenoton perimmäinen tarkoitus Kymen krematoriolla on alentaa savukaasujen lämpötilaa. Tästä syystä lämpöenergian päästäminen savukaasujen mukana taivaalle ei ole mahdollista. Mikäli lämpöenergialle ei ole kulutuskohdetta, täytyy lämpöenergia siirtää lauhduttimelle, joka huolehtii lämpöenergian siirtämisestä ulkoilmaan.

Krematorio toimii vain ajoittain ja todellinen toiminta-aika vaihtelee jopa päivittäin. Laskennan kannalta tulee arvioida tuhkausuunien käyttöaste ja se voidaan laskea seuraavasti

$$k_{\text{käyttöaste}} = \frac{d_{\text{työ}} \cdot h_{\text{käyttö}}}{8760 \text{ h}} \quad (23)$$

jossa	$k_{\text{käyttöaste}}$	käyttöaste kerroin	[-]
	$d_{\text{työ}}$	toimintapäivien lukumäärä	[kpl]
	$h_{\text{käyttö}}$	tuhkausuunin käyttöaika päivässä	[h/d]

$$k_{\text{käyttöaste}} = \frac{250 \text{ d} \cdot 8 \text{ h/d}}{8760 \text{ h}}$$

$$k_{\text{käyttöaste}} = 0,2283$$

Lämpöenergian siirtäminen ulkoilmaan lauhduttimella kuluttaa sähköenergiaa, eikä ole järkevää ympäristöystävällistä. Mikäli energiaa ei varastoida ja savukaasujen lämpöenergiasta käytetään hyväksi vain se mitä kappelin lämmitys kuluttaa, voidaan energiamäärä laskea seuraavasti

$$Q_{ei,varasto} = Q_{koko,a} \cdot k_{käyttöaste} \quad (24)$$

jossa	$Q_{ei,varasto}$	säästetty lämpöenergiapotentiaali ilman varastointia	[MWh]
	$Q_{koko,a}$	kokonaisvuosienergiankulutus	[MWh]
	$k_{käyttöaste}$	käyttöastekerroin	[-]

$$Q_{ei,varasto} = 333,89 \text{ MWh} \cdot 0,2283$$

$$Q_{ei,varasto} = 76,23 \text{ MWh}$$

Yksinkertaisin tapa varastoida lämpöenergiaa on käyttää isoa vesisäiliötä. Vesisäiliön vettä lämmitetään savukaasuista kerätyllä lämpöenergialla ja vastavasti vesisäiliön vettä käytetään lämmönkulutuskohteissa kuten pattereissa. Käytän esimerkkinä kolmea eri säiliökokoa, 50 m³, 100 m³ ja 150 m³. Voidakseen laskea säiliössä käytettävissä oleva lämpötila, ensin valitaan käytettävä lämpötilaero. Patteriverkoissa virtaavan veden menolämpötila on 60 °C. Vesisäiliöllä, joka on valmistettu muovista, on valmistajan antama maksimikäyttölämpötila 100 °C. Minimoidaksemme riskit ja maksimoidaksemme varauskyvyn asetamme oman maksimilämpötilan vesisäiliölle 95 °C:seen.

Koska tarkoituksena on käyttää varastoitua lämpöenergiaa kappelin lämmittämiseen, on yksinkertaisinta syöttää kuumaa vettä vesisäiliöstä sekoittimen kautta patteriverkkoon, niin kauan kunnes vesisäiliön lämpötila saavuttaa 60 °C. Kun vesisäiliön lämpötila on alle 60 °C, vesisäiliöstä ei enää syötetä lämpöä patteriverkkoon. Teoriassa vesisäiliön vettä olisi mahdollista käyttää tämän jälkeen esilämmittämään vettä, joka palaa patteriverkosta öljykattilalle. Tosin ainakin joissakin kattilamalleissa kattilaveden lämpötila on jo itsessään 65–75 °C.

Koska vesisäiliön lämpötilan tulee olla 60 °C ja 95 °C välillä, saamme lämpöenergia varaston ΔT arvoksi 35 °C. Lämpöenergiavaraston lämpöenergiakapasiteetti voidaan tällöin laskea kaavalla

$$Q_{säiliö} = \frac{V_{säiliö} \cdot c_{p,vesi} \cdot \rho_{vesi,95^\circ\text{C}} \cdot \Delta T_{säiliö}}{3600 \text{ s}} \quad (25)$$

jossa	$Q_{\text{säiliö}}$	säiliön potentiaalinen energiamäärä	[kWh]
	$V_{\text{säiliö}}$	säiliön tilavuus	[m ³]
	$c_{p,\text{vesi}}$	veden ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kg°C]
	$\Delta T_{\text{säiliö}}$	säiliön lämpötilan muutos	[°C]

Taulukossa 3 on laskettu eri säiliöiden hyödynnettävissä oleva lämpöenergiämäärä käyttämällä yllä olevaa kaavaa. Taulukon arvot on muunnettu MWh.

Taulukko 3 Eri säiliöiden hyödynnettävissä oleva lämpöenergiämäärä

Säiliön koko	Lämpöenergian määrä	
50	19,66	MWh
100	39,32	MWh
150	58,98	MWh

Varastoitavissa olevan energian laskemista varten tarvitsee ensin laskea jäännösenergia kaavalla

$$Q_{\text{jäännös}} = \frac{h_{\text{käyttö}} \cdot P_{\text{jäännös}} \cdot k_{\text{käyttöaste}}}{1000} \quad (26)$$

jossa	$Q_{\text{jäännös}}$	jäännösenergia	[MWh]
	$h_{\text{lämpö}}$	lämmön pysyvyys tunteina	[h]
	$P_{\text{jäännös}}$	veden ominaislämpökapasiteetti	[kW]
	$k_{\text{käyttöaste}}$	käyttöaste kerroin	[-]

Laskujen tulokset eri lämpötiloille ja säiliöille on nähtävissä liitteessä 3. Taulukossa jokaisessa lämpöenergian tulossolussa on "jos-ehto", jonka tarkoituksena on rajoittaa tulos säiliön maksimienergiatasoon. Potentiaalinen varastoitavissa oleva energia saadaan laskemalla yhteen kaikkien lämpötilojen jäännösenergiämäärät.

Taulukossa 4 on summattuna kolmen eri säiliön jäännösenergiämäärät. Saatut arvot ovat vuoden ajanjaksolla potentiaalisesti varastoitavissa oleva energiamäärä.

Taulukko 4 Jäännösenergiämäärät summattuna

Säiliön koko	Varastoitavissa oleva energia	
50	73,35	MWh
100	131,27	MWh
150	184,79	MWh

Säästöpotentiaali lämmityskustannuksissa silloin kun öljyn hinta on 100 €/MWh

$$\text{Säästö} = (Q_{\text{kok,jäännös}} + Q_{\text{ei,varasto}}) \cdot \ddot{O}_{\text{hinta}} \quad (27)$$

jossa	<i>Säästö</i>	potentiaalinen säästö	[€/a]
	$Q_{\text{kok,jäännös}}$	kokonaisjäännösenergia	[MWh]
	$Q_{\text{ei,varasto}}$	säästetty lämpöenergiapotentiaali ilman varastointia	[MWh]
	\ddot{O}_{hinta}	öljyn hinta	[€/MWh]

Taulukossa 5 on laskettuna vuosittainen potentiaalinen säästö 50 m³, 100 m³ ja 150 m³ säiliöille. Hinnassa (€/a) ja öljyn määrässä on huomioitu öljykattilan 95 % hyötysuhde.

Taulukko 5 Erikokoisten säiliöiden potentiaalinen säästö

Säiliön koko	Euroina [€/a]	Lämpöenergia [MWh]	Litraa öljyä [l/a]
50	15 714,07	149,58	15 714,07
100	21 798,87	207,50	21 798,87
150	27 421,33	261,02	27 421,33

7 TULOSTEN TARKASTELU

Lämmöntalteenottolaitteiston lämpöenergian vaatima pinta-ala on 22,81 m², silloin kun savukaasuista saatava teho on 209 kW. Koska savukaasukanava on kooltaan vain 0,44 m x 0,44 m, koko lämmönsiirrinlaitteiston kooksi tulee 8,25 m. Tämä on laitteiston mahtumisen kannalta ongelmallista sillä piirustusten mukaan (kuva 20), savukaasukanavaan mahtuu vain n. 2,4 m pitkä laitteisto. Koska savukaasukanava on purettava laitteistoa asennettaessa, olisi perusteltua kasvattaa samalla savukaasukanavan kokoa. Mikäli savukaasukanava olisi kooltaan 0,65 m x 0,65 m, lämmönsiirtimen kokonaispituudeksi tulisi 2,23 m. Tämä olisi hyvin kustannustehokas ratkaisu, mikäli savukaasu-

kanava haluttaisiin asentaa kohtaan, jossa savukaasukanava kulkee tällä hetkellä. Toisena vaihtoehtona olisi asentaa monimutkaisempi lämmönvaihdin, kuten levylämmönvaihdin. Levylämmönvaihtimen etuna olisi huomattavasti suurempi lämmönsiirtopinta-ala suhteessa kokoonsa. Tosin levylämmönvaihtimen puhdistaminen tuhkasta, nykyisessä savukaasukanavassa, saattaisi olla miltei mahdotonta.

Savukaasujen puhdistuslaitteiston vaatima tila on huomattava, eikä laitteistoa nykyisiin tiloihin ole mahdollista mahduttaa. Laitteistoa varten tulee todennäköisesti rakennuttaa erillinen tekninen tila, savukaasukanava ja savupiippu. Tontilla on kyllä tilaa rakennuttaa krematoriorakennukseen jatkoa/lisäsiipi. Mutta lisärakentaminen kohottaa investointikustannuksia huomattavasti.

Potentiaalinen säästö lämmityskustannuksissa on merkittävä, mikä on lämpöenerbiasäiliön koosta riippuen 45–78 % (150–261 MWh) vuosittaisesta lämmitysenergian tarpeesta. Todellisuudessa tähän ei päästä sillä tuhkausuunin savukaasuista on saatavissa huomattavasti enemmän energiaa, kuin pystytään kappelissa käyttämään. Lämpöenergiavaraston ollessa täynnä joudutaan ylimääräinen lämpöenergia johtamaan lauhduttimelle. Yhtenä vaihtoehto olisi jättää lämpöenergian varastointi kokonaan pois. Tässä tapauksessa ylijäämälämpöä käytettäisiin vain silloin kun krematorio on käynnissä. Krematorion savukaasuista kerättävä lämpöenergia riittää kattamaan Parikan kappelin lämmitystarpeen ollessaan toiminnassa. Ylimääräinen energia siirrettäisiin silloin lauhduttimelle. Potentiaalinen energiansäästö olisi tällöin 76 MWh vuodessa, mikä vastaa n. 22 % vuoden lämmitystarpeesta.

Mikäli kappeli sijaitsisi kaukolämpöverkon alueella, voitaisiin ylimääräinen lämpöenergia syöttää kaukolämpöverkkoon. Tämä ratkaisu on käytössä muutamassa muussa krematoriossa ja on ratkaisuna energiatehokas. Valitettavasti krematorio ei sijaitse kaukolämpöverkon alueella, eikä Kotkan energialle ole suunnitelmia laajentaa alueelle lähitulevaisuudessa.

8 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli mitoittaa ja suunnitella lämmöntalteenotto Kymin krematorioon. Opinnäytetyön tuloksena saatiin laskennallisesti mitoitettua lämmön talteenottolaitteiston mitat sekä teho. Laskettuja potentiaalisia energiansäästöjä voidaan käyttää arvioidessa laitteiston asennuksen takaisinmaksuikoja. Opinnäytetyön laskennassa päädyttiin käyttämään yksinkertaista putkilämmönvaihdinta, sillä savukaasukanavan ollessa ahdas, monimutkaisen lämmönsiirtimen nuohoaminen olisi hyvin vaikeaa, ellei mahdotonta.

Opinnäytetyön päätavoitteena oli suunnitella lämpöenergian talteenottolaitteisto, jonka avulla tuhkausuunin savukaasujen lämpötilaa saataisiin madallettua savukaasujen puhdistusta varten. Savukaasujen mukana ympäristöön päätyy huomattavia määriä ympäristölle vaarallisia aineita, kuten elohopeaa. Seurakuntien halu suodattaa savukaasuja, sekä tulevaisuudessa tiukentuvien ympäristösäädösten seurauksena, krematorioiden tulee investoida opinnäytetyössä esitellyn lämmönsiirtimen tapaisiin laitteistoihin. Savukaasujen lämpöenergian hyödyntäminen tuo myös säästöjä lämpöenergiakustannuksiin ja vähentää siten myös Parikan kappelin hiilijalanjälkeä.

Vaikkakin työn tulos osoitti että putkimallinen lämmönsiirrin ei mahdu siihen osaan savukaasukanavaa, kuin oli alun perin suunniteltu, voidaan työn tuloksia kuitenkin pitää hyödyllisinä. Opinnäytetyön tulosten avulla Kotka-Kymin seurakunnan on mahdollista tarkastella ja suunnitella krematorioinvestointia realistisesti. Tulosten avulla on mahdollista paremmin kartoittaa tarpeita ja tarkistaa odotuksia laitteiston mahdollisesta toiminnasta.

Koska opinnäytetyön aikana ei saatu savukaasujen lämpötilaa varmuudella todennettua, on suositeltavaa suorittaa lisämittauksia ennen jatkotoimenpiteitä. Opinnäytetyön laskentaan toivat omaa epävarmuutta myös vaihtelevat parametrit. Koska jokainen tuhkaus on uniikitapahtuma, oli laskentaa suoritettava keskiarvopohjalta. Savukaasujen vaihtelevan tehon takia lämmönvaihdin tulisi mitoittaa vieläkin opinnäytetyön laskelmissa esitettyä tehokkaammaksi, jotta voitaisiin varmistua siitä että savukaasujen loppulämpötila saadaan savukaasujen puhdistuksella tarpeeksi alhaiseksi.

LÄHTEET

Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J. & Korhonen, J. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. WWW-dokumentti.

Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T258.pdf> [viitattu 1.6.2018].

Fagerholm, N. 1986. Termodynamiikka. 1994 painos. Otatieto Oy.

Ilmatieteenlaitos s.a. Ulkoilman lämpötilojen esiintymistiheys nykyilmastossa (TRY2012) pysyvyyssarvoina vyöhykkeillä I-II (Vantaa). WWW-dokumentti.

Saatavissa:

http://ilmatieteenlaitos.fi/c/document_library/get_file?uuid=aa04206f-1c99-4e62-a44d-fec3d25a3118&groupId=30106 [viitattu 1.6.2018].

Malinen, E. 2018. Krematorionhoitaja. Haastattelu maaliskuu 2018. Kotka: Kymen krematorio.

Mäkilä, T. 2018. Tmi Energianhallinta, Omistaja. Sähköpostihaastattelu maaliskuu 2018.

Ollila, J. 2018. Hautaustoimen päällikkö. Haastattelu 5.4.2018. Espoo: Espoon kappeli.

Seppänen, R., Tiihonen, S., Wuolijoki, H., Kervinen, M., Smolander, J., Haavisto, A., Karkela, L. & Varho, K. 2000. MAOL-taulukot. 1.-2. uudistettu painos. Keuruu: Otavankirjapaino Oy.

Valtanen, E. 2012. Tekniikan taulukkokirja. 19.painos. Mikkeli: St Michel Print Oy.

VDI Heat Atlas. 1993. Painos 2010. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.

Wagner, W. 1994. Lämmönsiirto. Helsinki: Painatuskeskus Oy.

KUVALUETTELO

Kuva 1. Parikan kappeli. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.kotka-kyminseurakunta.fi/5761-parikan-siunauskappeli> [viitattu 1.6.2018].

Kuva 2. Espoon siunauskappeli. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.espoonseurakunnat.fi/kirkot-ja-tilat/kappelit/espoon-siunauskappeli> [viitattu 1.6.2018].

Kuva 3. Kuva Espoon krematorion lämmöntalteenoton ohjausnäkyästä. Heikkilä, L. 5.4.2018.

Kuva 4. Espoon siunauskappelin krematorion lämmön talteenottojärjestelmän havainnointi kuva. Heikkilä, L. 5.4.2018.

Kuva 5. Pyhän Ristin kappeli. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.turunseurakunnat.fi/kirkot-ja-kappelit/pyhan-ristin-kappeli> [viitattu 1.6.2018].

Kuva 6. Lämmöntalteenottolaitteiston virtauskaavio. Heikkilä, L. 3.6.2018.

Kuva 7. Espoon krematorion lämmönvaihdin. Heikkilä, L. 5.4.2018.

Kuva 8. Lämmön talteenottolaitteen toiminta kuvana. Heikkilä, L. 30.5.2018.

Kuva 9. Lämmönvaihtimen piirrosmerkki. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.draw.io> [viitattu 15.4.2018].

Kuva 10. Esimerkkikuva sekoitusventtiilistä. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://media.taloon.com/image/upload/q_70,f_auto,w_1200,h_1200,c_limit/cloud/k/oras/sekoitusventtiili_oras_4210_57c.jpg [viitattu 15.4.2018].

Kuva 11. Sekoitusventtiilin piirrosmerkki. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.draw.io> [viitattu 15.4.2018].

Kuva 12. Esimerkkikuva lämmönsäätimestä. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://media.taloon.com/image/upload/q_70,f_auto,w_400,h_650,c_limit/cloud/k/vexve/lammonsaadin_vexve_am10_automix.jpg [viitattu 15.4.2018].

Kuva 13. Esimerkkikuva kiertovesipumpusta. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://media.taloon.com/image/upload/q_70,f_auto,w_1200,h_1200,c_limit/cloud/k/grundfos/kiertovesipumppu_alpha_1.jpg [viitattu 15.4.2018].

Kuva 14. Parikan kappelin öljykattila. Heikkilä, L. 16.3.2018.

Kuva 15. Kappelin lämmitykseen käytettävän öljykattilan ja krematorion piirrosmerkki. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.draw.io> [viitattu 15.4.2018].

Kuva 16. Lauhduttimen piirrosmerkki. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.draw.io> [viitattu 15.4.2018].

Kuva 17. Patteriverkon piirrosmerkki. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.draw.io> [viitattu 15.4.2018].

Kuva 18. Vesisäiliön piirrosmerkki. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.draw.io> [viitattu 15.4.2018].

Kuva 19. Krematorio ulkopuolelta. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.google.com/maps> [viitattu 15.4.2018].

Kuva 20. Savukaasukanavan (vihreä), sekä savupiipun sijainti (punainen). Törrönen, K. toukokuu.2018.

Kuva 21. Havainnekuva savukaasukanavasta. Heikkilä, L. 20.4.2018.

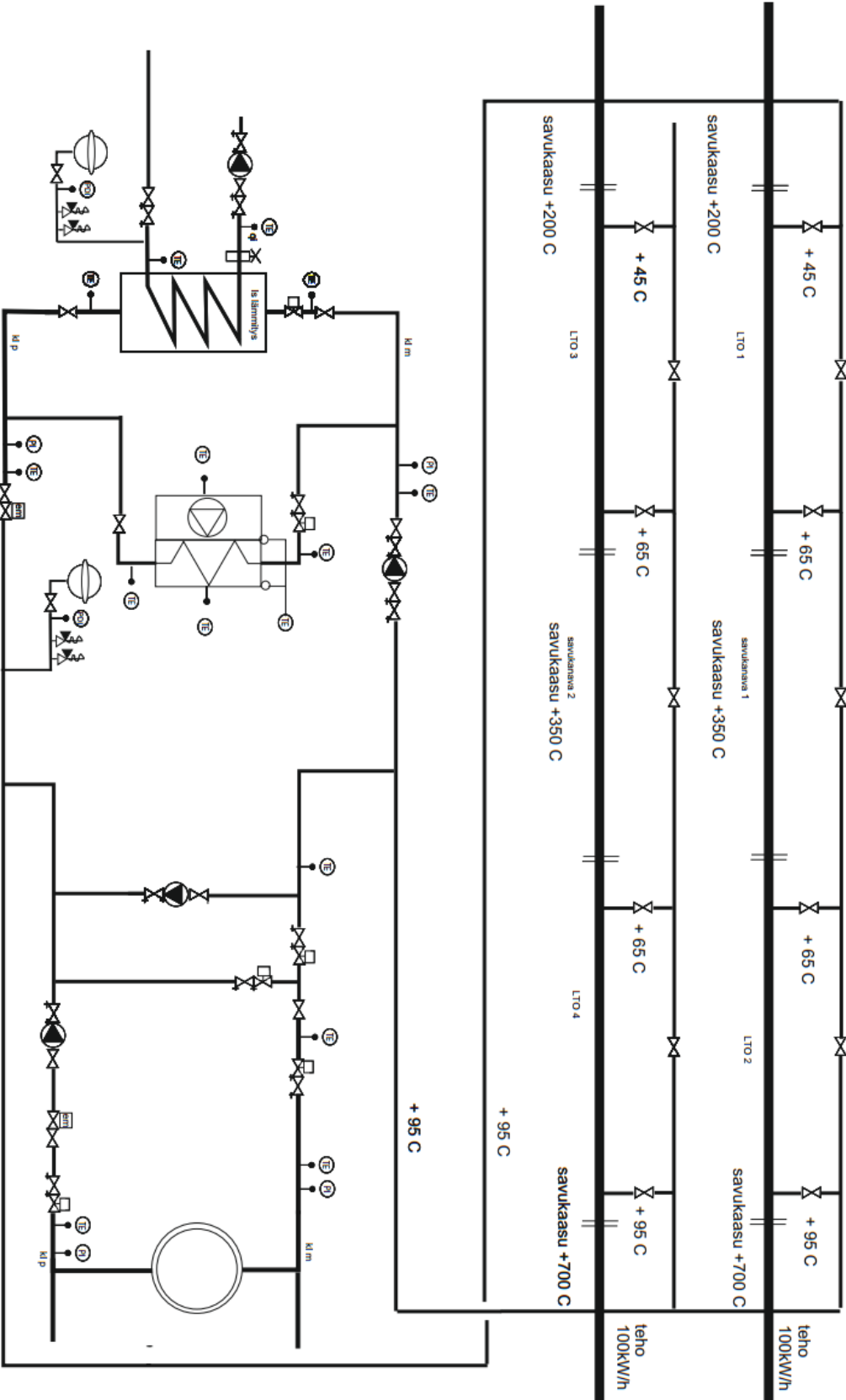
Kuva 22. Krematorion hallintajärjestelmän loki. Heikkilä, L. 4.7.2017.

Kuva 23. Lämpötilan muutokset lämmönvaihtimessa. Heikkilä, L. 1.4.2018.

Kuva 24. 26 Havainnekuva lämmönsiirtimen putkista. (Edestä katsottuna). Heikkilä, L. 15.4.2018.

Kuva 25. Havainnekuva lämmönsiirtimen putkista savukaasukanavassa. (sivulta). Heikkilä, L. 2.6.2018.

Pyhän Ristin kappelin savukaasu LTO



liite 2

Q[MWh]	P [kW]	Ulkoilma [°C]	Lämpötilan pysyvyys	Δ Lämpötilan pysyvyys	h/h _a [h]	Jäännösteho [kW]
0,71	100,90	-21,0	0,0008	0,0008	7,01	108,17
1,90	98,50	-20,0	0,0030	0,0022	19,27	110,57
2,19	96,10	-19,0	0,0056	0,0026	22,78	112,97
1,97	93,69	-18,0	0,0080	0,0024	21,02	115,37
2,72	91,29	-17,0	0,0114	0,0034	29,78	117,78
4,91	88,89	-16,0	0,0177	0,0063	55,19	120,18
7,20	86,49	-15,0	0,0272	0,0095	83,22	122,58
5,30	84,08	-14,0	0,0344	0,0072	63,07	124,98
5,87	81,68	-13,0	0,0426	0,0082	71,83	127,39
4,10	79,28	-12,0	0,0485	0,0059	51,68	129,79
3,77	76,88	-11,0	0,0541	0,0056	49,06	132,19
3,65	74,47	-10,0	0,0597	0,0056	49,06	134,59
5,49	72,07	-9,0	0,0684	0,0087	76,21	137,00
8,67	69,67	-8,0	0,0826	0,0142	124,39	139,40
9,84	67,27	-7,0	0,0993	0,0167	146,29	141,80
10,97	64,86	-6,0	0,1186	0,0193	169,07	144,20
10,89	62,46	-5,0	0,1385	0,0199	174,32	146,60
11,57	60,06	-4,0	0,1605	0,0220	192,72	149,01
12,32	57,66	-3,0	0,1849	0,0244	213,74	151,41
13,07	55,25	-2,0	0,2119	0,0270	236,52	153,81
15,93	52,85	-1,0	0,2463	0,0344	301,34	156,21
26,16	50,45	0,0	0,3055	0,0592	518,59	158,62
23,74	48,05	1,0	0,3619	0,0564	494,06	161,02
20,99	45,65	2,0	0,4144	0,0525	459,90	163,42
15,30	43,24	3,0	0,4548	0,0404	353,90	165,82
11,45	40,84	4,0	0,4868	0,0320	280,32	168,23
11,58	38,44	5,0	0,5212	0,0344	301,34	170,63
10,04	36,04	6,0	0,5530	0,0318	278,57	173,03
10,08	33,63	7,0	0,5872	0,0342	299,59	175,43
8,75	31,23	8,0	0,6192	0,0320	280,32	177,84
8,21	28,83	9,0	0,6517	0,0325	284,70	180,24
7,66	26,43	10,0	0,6848	0,0331	289,96	182,64
7,05	24,02	11,0	0,7183	0,0335	293,46	185,04
6,33	21,62	12,0	0,7517	0,0334	292,58	187,45
6,20	19,22	13,0	0,7885	0,0368	322,37	189,85
4,99	16,82	14,0	0,8224	0,0339	296,96	192,25
4,19	14,41	15,0	0,8556	0,0332	290,83	194,65
3,71	12,01	16,0	0,8909	0,0353	309,23	197,05
2,01	9,61	17,0	0,9148	0,0239	209,36	199,46
1,30	7,21	18,0	0,9354	0,0206	180,46	201,86
0,77	4,80	19,0	0,9537	0,0183	160,31	204,26
0,34	2,40	20,0	0,9699	0,0162	141,91	206,66

Liite 3

Ulkoilma [°C]	Jäännösteho [kW]	Jäännösenergia 50m3 [MWh]	Jäännösenergia 100m3 [MWh]	Jäännösenergia 150m3 [MWh]
-21,0	108,17	0,173	0,173	0,173
-20,0	110,57	0,487	0,487	0,487
-19,0	112,97	0,587	0,587	0,587
-18,0	115,37	0,554	0,554	0,554
-17,0	117,78	0,801	0,801	0,801
-16,0	120,18	1,514	1,514	1,514
-15,0	122,58	1,966	2,329	2,329
-14,0	124,98	1,800	1,800	1,800
-13,0	127,39	1,966	2,089	2,089
-12,0	129,79	1,531	1,531	1,531
-11,0	132,19	1,481	1,481	1,481
-10,0	134,59	1,507	1,507	1,507
-9,0	137,00	1,966	2,384	2,384
-8,0	139,40	1,966	3,932	3,959
-7,0	141,80	1,966	3,932	4,736
-6,0	144,20	1,966	3,932	5,566
-5,0	146,60	1,966	3,932	5,835
-4,0	149,01	1,966	3,932	5,898
-3,0	151,41	1,966	3,932	5,898
-2,0	153,81	1,966	3,932	5,898
-1,0	156,21	1,966	3,932	5,898
0,0	158,62	1,966	3,932	5,898
1,0	161,02	1,966	3,932	5,898
2,0	163,42	1,966	3,932	5,898
3,0	165,82	1,966	3,932	5,898
4,0	168,23	1,966	3,932	5,898
5,0	170,63	1,966	3,932	5,898
6,0	173,03	1,966	3,932	5,898
7,0	175,43	1,966	3,932	5,898
8,0	177,84	1,966	3,932	5,898
9,0	180,24	1,966	3,932	5,898
10,0	182,64	1,966	3,932	5,898
11,0	185,04	1,966	3,932	5,898
12,0	187,45	1,966	3,932	5,898
13,0	189,85	1,966	3,932	5,898
14,0	192,25	1,966	3,932	5,898
15,0	194,65	1,966	3,932	5,898
16,0	197,05	1,966	3,932	5,898
17,0	199,46	1,966	3,932	5,898
18,0	201,86	1,966	3,932	5,898
19,0	204,26	1,966	3,932	5,898
20,0	206,66	1,966	3,932	5,898
Yhteensä [MWh]		73,35	131,27	184,79